ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Российский научно-исследовательский институт
комплексного использования и охраны водных ресурсов
(ФГБУ РосНИИВХ)

ВОДНОЕ ПАРТНЕРСТВО: ЭКОСИСТЕМНЫЙ ПОДХОД, ЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ОРИЕНТИРЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Сборник материалов Международной научно-практической конференции

5 - 9 октября 2026 года, г. Волгоград

г. Новочеркасск
Лик
2026

УДК 338.24:502/504:551.583(082)
ББК 65.286:20.18:26.237я43
В 62

Редакционная группа:
Болгов М.В., д-р техн. наук
Дедова Э.Б., д-р с.-х. наук
Журавлев С.А., канд. геогр. наук
Косолапов А.Е., д-р техн. наук
Фролова Н.Л., член-корр. РАН, д-р геогр. наук

В 62 Водное партнерство: экосистемный подход, лучшие практики и стратегические ориентиры в условиях изменения климата: сборник материалов Международной научно-практической конференции, г. Волгоград, 5 - 9 октября 2026 г. - Новочеркасск: Лик, 2026. - 358 с.

ISBN 978-5-908060-58-5

В сборнике опубликованы доклады участников Международной научно-практической конференции «Водное партнерство: экосистемный подход, лучшие практики и стратегические ориентиры в условиях изменения климата» (г. Волгоград, 5 - 9 октября 2026 г.), посвященные вопросам международного сотрудничества, инновационным методам управления водными ресурсами и адаптации к новым климатическим реалиям.

Доклады опубликованы в авторской редакции с незначительными техническими правками.

The collection includes papers presented by participants of the International Scientific and Practical Conference “Water Partnership: an Ecosystem Approach, Best Practices and Strategic Guidelines in the Context of Climate Change” (Volgograd, October 5–9, 2026), which focus on issues of international cooperation, innovative methods of water resource management, and adaptation to new climatic realities.

The reports are published in the author's version with insignificant technical corrections.

УДК 338.24:502/504:551.583(082)
ББК 65.286:20.18:26.237я43

ISBN 978-5-908060-58-5 © Федеральное агентство водных ресурсов, 2026

©Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский научно-исследовательский институт
комплексного использования и охраны водных ресурсов», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Архитектура водного сотрудничества

Фролова Н.Л. Изменение водного режима рек России и его влияние на водную безопасность…… 6

Болгов М.В. Гидрологические аспекты использования трансграничных водных ресурсов……..……. 15

Шевченко В.А., Дедова Э.Б., Исаева С.Д., Дедов А.А. Концептуальная модель интегрального обоснования перераспределения водных ресурсов для повышения водообеспеченности вододефицитных регионов…….….. 31

Субботина Е. Г., Ковтун Н.Н. Водное партнерство при формировании и реализации федерального проекта «Вода России» национального проекта «Экологическое благополучие»……. 41

Косолапов А.Е., Савостицкий Д.В., Головачева М.М. Создание сегмента «Управление водохранилищами» в составе ГИС ЦП «Вода»……... 47

Никитина О.И., Косолапов А.Е. Болгов М.В. Разработка принципов межгосударственного вододеления реки Иртыш в условиях функционирования Верхне-Иртышского каскада водохранилищ с учетом экосистемных требований……..……. 56

Новиков А.А., Кружилин И.П. Эффективность использования воды в орошаемом земледелии ……... 65

Головачева М.М. Управление режимом работы Ириклинского водохранилища в условиях неполной информации и в условиях неопределенности…… 70

Цатурян М.Г., Головачева М.М., Бабичев А.А., Косолапов А.А. Управление водохранилищами с использованием элементов искусственного интеллекта…… 80

Бут К.С. Использование ансамбля нейросетевых моделей при дешифрировании космоснимков для определения обводненности территорий…… 90

Ерёмина Д.С. Техногенная фрагментация речных систем Восточного Приазовья: экологические последствия и пути восстановления в условиях климатических изменений…….. 98

Пыленок П.И. Мелиоративные ресурсосберегающие технологии управления водопользованием в болотных экосистемах Нечерноземной зоны России…… 104

Яковлев С.В., Косолапов А.Е., Горелиц О.В., Капустин М.В., Бут К.С. Организация оперативного мониторинга в Нижней Волге при прохождении специального весеннего попуска с Волгоградской ГЭС весной 2026 года с применением данных дистанционного зондирования земли……..…… 112

Домуллоджанов Д.Х. Решения на основе природы для мелиорации горных агроландшафтов на примере Таджикистана……..…….……. 125

Лытов М.Н. Научные подходы и новые принципы нормирования орошения и планового водопользования……...…… 133

Климатические вызовы и адаптация

Кирейчева Л.В. Прецизионное управление поливами по текущим агрометеопараметрам и научные подходы к созданию автоматизированных оросительных систем …… 141

Курочкина Л.С., Журавлев С.А. Изменчивость и изменения годового и максимального стока рек в бассейнах Белого и Балтийского морей…… 150

Булак И.А., Музыкин В.П., Русина А.Ю. Взаимовлияние подземных и поверхностных вод на примере бассейнов рек Днепр и Западная Двина в пределах Беларуси……..…… 154

Бубер А.Л., Бубер А.А., Талызов А.А., Жезмер В.Б. Многоцелевой самотечный канал «Волгоградское водохранилище – р. Ахтуба» для

восстановления рыбного хозяйства Нижней Волги и обеспечения объектов мелиорации Волго-Ахтубинского региона и дельты Волги оросительной водой 162
Гаппаров Ф.А., Ганиев М.Ш., Шамуратова Н.Г., Хасанов Ж.Д., Менлимуратова С.Ж. Экологические последствия деградации Аральского моря: фитосанитарное состояние саксауловых лесов Аралькума……. 171
Горелиц О.В., Землянов И.В., Павловский А.Е., Милютина И.Ю., Мигунов Д.А., Ермакова Г.С. Гидродинамическое моделирование в прикладных исследованиях в устьевых областях рек…… 181
Кониева Г.Н. Зональные климатические изменения и землепользование в Калмыкии……. 189
Лоскин М.И. Особенности водообеспеченности сельских территорий Якутии в условиях изменения климата…….. 196
Лопатина И.Б. Управление водными ресурсами в эпоху климатического хаоса: интеграция машинного обучения, климатических сценариев и биоинженерных конструкций……..……. 203
Петров А.А., **Сабиров М.Р.** Применение бетонного полотна для облицовки грунтовых ирригационных каналов: преимущества и перспективы в условиях Республики Узбекистан…… 210
Самойлова С.Ю. Пространственно-временная изменчивость внутригодового распределения стока рек бассейна Верхней Оби под влиянием климатических изменений……..…… 214
Шаламов Д.И., Стрижников О.А. Оценка загрязнения поверхностных и дренажных вод осушительной сети на водосборе р. Жабенка…… 219
Зинченко Е.В., Мамин В.Ф. Экологическая устойчивость луговых лиманов Северного Прикаспия……..…… 226
Акромов Б.А. Роль полезной энтомофауны в устойчивости агроценозов лука и чеснока Узбекистана в условиях глобального потепления …….. 234
Сметанин В.И. К опустыниванию земель в Астраханской области…….. 239
<u>Антропогенная нагрузка и качество воды</u>
Трофимчук М.М., Кондакова М. Ю. Состояние водной экосистемы трансграничной р. Урал: термодинамика……. 256
Абдиева М.Ш., Садиев Ф.Ф. Комплексная оценка качества вод бассейна реки Зеравшан на основе гидрохимических показателей…….…… 267
Исаев О.И. Экономическое планирование водораспределения на основе нексус-подхода……..…… 273
Даниленко А.О., Коваленко А.А., Коваленко Д.Е. Многолетняя динамика показателей состава и свойств поверхностных вод в бассейне Верхнего Дона в условиях современных климатических изменений…….…. 284
Санин А.Ю. Экосистемные услуги морей и приморских территорий европейского юга России …….. 293
Даниленко А.О., Баумара М.А. Сверхнормативный перенос загрязняющих веществ через границу Российской Федерации трансграничными водотоками в 2021-2025 гг……..... 303
Адучиева М.Г., Кониева Г.Н. Качество оросительных вод в Республике Калмыкия…….. 310
Торопов А. Ю., Куприянов А.А. Пространственно-временная изменчивость минерализации донских вод при их переброске в Береславское водохранилище по обводнительному каналу (2012-2023 гг.)……..…… 317
Арзямова О.В., Дурдыева О.П. Защита водных ресурсов - приоритетное направление государственной политики Туркменистана …….... 322

Экономика природопользования: стратегия и инновации

Землянов И.В., Савельев Ф.Е., Коновалов М.Л., Кудряшов С.А., Ермакова Г.С., Рыбина Е.Ю., Турсунова Г.Ш. Специализированная геоинформационная база данных как средство поддержки принятия решений в водохозяйственной и экологической сфере (на примере степных рек междуречья Кубани и Дона……. 327

Экология воды: общество, наука и бизнес

Кепбанов П.А., Овезбердыева А. Водные ресурсы и экология Туркменистана… 339

Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы секвестрационные технологии

Фролова Н.Л., Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М. Эмиссия метана из водохранилищ России: данные наблюдений и математического моделирования……..…… 346

Усова Е.В., Дмитрик Л.Ю., Анпилова Е.Л., Верещагин М.А. Результаты суточных наблюдений за концентрацией метана в воде Цимлянского водохранилища.……..……. 350

Архитектура водного сотрудничества

ИЗМЕНЕНИЕ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК РОССИИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ВОДНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ

Фролова Н.Л.
Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
E-mail: frolova_nl@mail.ru

Аннотация: В работе проанализированы современные изменения водного режима рек России, обусловленные глобальным потеплением и антропогенными воздействиями. Выявлена устойчивая региональная дифференциация: рост водности в северных и восточных бассейнах контрастирует с прогрессирующим снижением стока на юге Европейской территории. Эти сдвиги усиливают частоту и интенсивность гидрологических экстремумов – от разрушительных паводков до затяжных маловодий, – создавая прямые угрозы водоснабжению, энергетике и сельскому хозяйству. Прогнозные оценки до конца века указывают на сохранение и усиление этих тенденций, особенно критичных для густонаселённых аграрных регионов.

Ключевые слова: речной сток, изменения климата, безопасность населения и хозяйства.

CHANGES IN THE WATER REGIME OF RUSSIAN RIVERS AND THEIR IMPACT ON THE WATER SECURITY

Frolova N.L.
Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University
E-mail: frolova_nl@mail.ru

Abstract. The study examines current changes in the river flow regime of Russia driven by global warming and human activities. A persistent regional contrast is revealed: increasing water availability in northern and eastern basins versus a progressive decline in southern European Russia. These shifts amplify the frequency and severity of hydrological extremes – from devastating floods to prolonged low-flow periods – posing direct threats to water supply, energy, and agriculture. Projections for the end of the century suggest these trends will continue, becoming especially critical for densely populated farming regions.

Keywords: river runoff, climate change, safety of the population and economic activities.

Введение. Водная безопасность - одна из главных мировых проблем, без которой невозможно достичь целей устойчивого развития. В самом широком смысле угрозы водной безопасности сводятся к трем основным проблемам: физическая нехватка воды (гидрологические засухи), избыток воды (наводнения) и низкое качество пресной воды. Эти угрозы усугубляются как природными факторами (изменение климата), так и антропогенными (рост населения, неэффективное управление, изменение землепользования). Особую остроту этим вызовам придает антропогенное изменение климата, которое трансформирует гидрологический цикл, усиливая изменчивость водных ресурсов и частоту экстремальных гидрологических явлений.

Для России, обладающей одними из крупнейших в мире запасов пресной воды, проблемы водной безопасности имеют ярко выраженную региональную специфику. В то время как в целом по стране обеспеченность водными ресурсами остается высокой, в последние десятилетия наблюдается значительная перестройка внутригодового и многолетнего водного режима рек, особенно в южных и засушливых регионах, а также

в зонах с преобладанием снегового и ледникового питания. Происходящие изменения – от устойчивого снижения стока на реках Дона, Кубани и Нижней Волги до увеличения стока в сибирских арктических бассейнах и трансформации сроков и величин половодий – создают новые риски для водоснабжения населения, сельского хозяйства, гидроэнергетики и экосистем. Кроме того, наблюдаемая деградация многолетней мерзлоты, сокращение площади снежного покрова и таяние горных ледников на Кавказе не только влияют на объемы доступных водных ресурсов, но и повышают опасность катастрофических паводков, включая прорывы ледниковых озер. Понимание этих изменений и их последствий для водной безопасности страны становится важнейшей научной и практической задачей.

Цель настоящего доклада – обобщить современные данные о происходящих и прогнозируемых изменениях водного режима рек России, выявить основные климатические и антропогенные факторы этих изменений и оценить их влияние на водную безопасность страны в разрезе отдельных регионов.

Изменения водного режима рек Европейской территории России. На Европейской территории России (ЕТР) наблюдаются разнонаправленные изменения водного режима, что создаёт сложную мозаику водохозяйственных проблем. Общая тенденция заключается в росте годового стока на преобладающем большинстве водосборов — водность рек увеличилась на 20–50% относительно базисного периода. Наиболее заметен этот рост в бассейне Камы, других левобережных притоков Волги, а также рек Северо-Запада Русской равнины. Однако за этой общей картиной скрываются существенные региональные различия [1].

Особая ситуация в бассейне Дона — единственном крупном регионе на Русской равнине, где в последние десятилетия выражена статистически достоверная тенденция снижения водности. В верхнем течении Дона снижение укладывается в диапазон до 10%, но с продвижением на юго-восток оно нарастает, достигая в замыкающем створе около 25% по сравнению с предшествующим периодом. Это создаёт реальные проблемы для водоснабжения густонаселённых и экономически важных южных регионов, где дефицит водных ресурсов и без того ощущается остро.

Наиболее интенсивное уменьшение максимальных расходов воды фиксируется в бассейнах Дона и Оки — с конца 1970-х годов снижение составляет в среднем 45 и 35% соответственно. Одновременно с этим существенно увеличился разброс дат прохождения максимумов: если раньше пики половодья наблюдались преимущественно в первой-второй декаде апреля, то в последние десятилетия они всё чаще смещаются на середину, а иногда и на начало марта. В то же время на реках северных и восточных

районов Европейской части России тенденция снижения максимумов практически не выражена, а на левобережных притоках Верхней Волги наблюдается даже рост максимальных расходов на 10–50% [1].

Изменения водного режима рек Азиатской части России. Для азиатской территории России (АТР) картина изменений стока также неоднородна, но здесь преобладает тенденция к росту водности. Годовой сток рек Сибири и Дальнего Востока, впадающих в арктические моря, неуклонно растёт с 1980-х годов. В 1989–2022 гг. суммарный годовой сток воды в моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское вырос на 238 км^3 в год, или 8,9%, по сравнению с 1936–1988 гг. Это связано с общим ростом увлажнённости территории, более интенсивным таянием сезонных снегов и увеличением жидких осадков в период весеннего половодья. Однако и для АТР есть регионы со снижением стока. Наиболее выраженная зона с отрицательными аномалиями (от –10 до –50% и более) расположена в Забайкалье и верховьях Амура. В бассейне Селенги, крупнейшего притока Байкала, снижение стока достигает 34,7%. Это создаёт серьёзные проблемы для экосистемы уникального озера Байкал и для водоснабжения прилегающих территорий. На Чукотке, северном побережье Охотского моря и большей части Камчатского полуострова также наблюдаются отрицательные аномалии стока [1].

Что касается максимального стока, то реки на юго-востоке АТР со значительной ролью летне-осенних дождевых паводков демонстрируют уменьшение максимальных расходов, тогда как у рек с основной фазой в весеннее половодье доминирует их увеличение. Максимальные расходы на замыкающих створах Оби, Енисея, Лены и Колымы уменьшились на 2–8% в сравнении с 1936–1975 гг. Интересно, что у рек Алтая отрицательный тренд максимального стока сменился на положительный в 1990–2010-х годах, что связано с потеплением весной, вследствие чего снеготаяние охватывает одновременно несколько высотных поясов.

Изменения водного режима рек оказывают многоплановое влияние на водную безопасность России. Можно выделить несколько ключевых аспектов этой проблемы. На фоне общего роста водности северных и восточных регионов южные и центральные районы страны испытывают всё более острый дефицит водных ресурсов. Особенно критична ситуация в бассейнах Дона, Кубани и Нижней Волги, где снижение стока совпадает с высокой антропогенной нагрузкой и потребностями крупных агропромышленных и городских агломераций. Неравномерность распределения водных ресурсов по территории страны, ведущая к дефициту в ряде регионов, а также сезонная неравномерность водного стока создают дополнительные риски.

Изменение климата ведёт к учащению опасных гидрологических явлений. Мощные наводнения могут стать новой климатической нормой для России в ближайшие 30–40 лет. Особенно уязвимы районы Сибири и Дальнего Востока. Ущерб от наводнений на Дальнем Востоке с 2020 по 2023 гг. составил более 41 млрд рублей. Учащение опасных явлений требует значительных затрат на защиту территорий и создаёт угрозы для населения и инфраструктуры.

Изменения климата влияют на трансграничные водные ресурсы. В бассейне Амура изменение режима стока может обострять трансграничные водохозяйственные отношения.

Одним из наиболее значимых последствий климатических изменений является трансформация внутригодового распределения стока. Для рек Европейской России, исторически характеризовавшихся снеговым питанием, происходит существенное изменение сезонности: зимний сток увеличивается, а весеннее половодье уменьшается и смещается на более ранние сроки. Это создаёт новые проблемы для управления водными ресурсами, гидроэнергетики и водоснабжения. Рассмотрим данную ситуацию более подробно.

Влияние изменений весеннего стока рек Европейской территории России на водную безопасность. Весеннее половодье на реках Европейской территории России традиционно является главной фазой водного режима, формируя от 40 до 100 % годового стока. Именно оно в течение 1–3 месяцев прямо, а на протяжении остального года косвенно определяет условия жизнедеятельности населения, работу промышленности, энергетики, сельского хозяйства и всей водохозяйственной инфраструктуры. В условиях современных климатических изменений трансформация параметров половодья создаёт комплекс прямых и косвенных угроз водной безопасности страны, которые детально анализируются нами на основе данных 348 гидропостов и реанализа ERA5 за период 1980–2017 гг. [2].

1. Увеличение рисков наводнений и повреждения инфраструктуры. Одной из наиболее острых проблем остаются наводнения, связанные с весенним половодьем. Особую опасность представляют поздние половодья, которые характеризуются высокой интенсивностью развития и большим паводковым стоком на спаде или после окончания половодья. В ходе исследования выявлено, что на большей части ЕТР произошло смещение сроков прохождения максимумов половодья. В верховьях Дона и Оки, в среднем течении Оки и в бассейне Суры максимумы и раньше наблюдались в середине февраля, а в последние десятилетия сроки стали смещаться на первую половину февраля. В среднем течении Дона ранее максимум приходился на конец марта – начало апреля,

теперь же он сдвинулся на 8–15 дней раньше – на середину, а иногда и начало марта. В южной части бассейна Дона, напротив, отмечен сдвиг на более поздние сроки (на 7–10 дней) в бассейнах притоков Цимлянского водохранилища. Такая асинхронность и смещение пиков создают дополнительные трудности для оперативного прогнозирования и подготовки к паводкам, повышая вероятность непредвиденных затоплений, особенно в густонаселённых и хозяйственно освоенных регионах.

2. Проблемы управления водохранилищами и водохозяйственными системами. Управление крупными водохранилищами (Волжско-Камский каскад, Цимлянское и др.) напрямую зависит от точности прогнозов притока в период половодья. Отмечающееся в последние десятилетия уменьшение весеннего стока вследствие изменений климата приводит к сложностям при управлении водохозяйственными системами. Рост повторяемости как единичных низких половодий, так и их серий неминуемо ведёт к развитию маловодий и росту рисков нарушения водообеспечения населения и объектов экономики. Особенно показательным является пример бассейна Дона, где с завершением условно естественного периода параметры весеннего половодья существенно изменились: ранее его доля в годовом стоке составляла здесь 75–85 %, сейчас – лишь до 65–75 %. Это означает, что водохранилища недополучают привычные объёмы воды, что нарушает графики наполнения и работы гидроузлов – для энергетики, судоходства, орошения и рыбного хозяйства. В то же время поздние половодья с высокими пиками могут потребовать форсированных сбросов, что создаёт конфликт интересов между безопасностью плотин и сохранением водных ресурсов.

3. Угроза маловодий и дефицита водных ресурсов. Одним из наиболее значимых результатов работы является диагностика устойчивого снижения слоя весеннего стока в целом по ЕТР. Средняя за 1980–2017 гг. величина слоя стока составила 95 мм, но при этом выявлена ярко выраженная пространственная трансформация: произошло заметное изменение слоя весеннего стока», выразившееся в смещении к северу зон малого стока. Зона со средней величиной слоя менее 10 мм распространилась на север на 100–190 км (Краснодарский край, Приазовье, Нижняя Волга), на востоке ЕТР зона со слоем до 80 мм расширилась на 100–150 км к северу, а на западе – на 400 км к северу. Это означает, что аридные и семиаридные условия фактически наступают на традиционные сельскохозяйственные районы чернозёмной полосы, снижая объёмы доступной влаги для пополнения подземных горизонтов. Динамика слоя стока также свидетельствует о затяжном периоде низкой водности после 2006 г. При этом межгодовая изменчивость (коэффициент вариации) на юге ЕТР существенно возросла. Для водной безопасности это означает, что системы водоснабжения городов, промышленных центров и

орошаемого земледелия в южных регионах сталкиваются с возрастающей нестабильностью – периоды острого дефицита воды становятся более частыми и продолжительными.

4. Нарушение прогностических связей и необходимость пересмотра методик. Используемые методы прогноза весеннего половодья, разработанные в середине XX века, опирались на устойчивые связи между стоком, запасом воды в снеге, глубиной промерзания почвы и осадками в период половодья. Однако в современных климатических условиях классические факторы (запас воды в снеге, промерзание почвы) перестали быть универсально доминирующими. По нашим данным, запас воды в снежном покрове описывает лишь 10 % дисперсии стока, сумма твёрдых осадков – 60 %, а общие осадки – 30 %. Возросла роль оттепелей, характеристик таяния и влажности почвы. В зоне недостаточного увлажнения определяющими стали сроки залегания снега, температура воздуха зимой и продолжительность морозов. Это приводит к тому, что существующие прогнозные решения, особенно в бассейнах центра и юга ЕТР, теряют свою надёжность. Для водной безопасности это означает, что заблаговременное предупреждение о наводнениях или маловодьях становится менее точным, что увеличивает уязвимость населения и экономики. Требуется не только актуализация эмпирических зависимостей, но и внедрение новых подходов, учитывающих весь комплекс современных факторов [2].

5. Пространственные сдвиги и региональные последствия. Картирование показало, что наиболее интенсивное уменьшение максимальных расходов воды весеннего половодья фиксируется в бассейнах Дона (в среднем на 45 %) и Оки (на 35 %), а также в нижнем течении Волги. На западе Русской равнины снижение носит характер тенденции, тогда как на северных и восточных реках (Печора, Кама, Северная Двина) оно практически не выражено, а местами даже наблюдается рост. Это ведёт к перераспределению водных ресурсов между регионами: северные и восточные территории становятся относительно более водообильными, а южные и центральные – всё более вододефицитными. Таким образом, изменения весеннего стока на ЕТР влекут за собой многогранные угрозы водной безопасности: от учащения опасных гидрологических явлений и нарушения работы водохранилищ до нарастания дефицита водных ресурсов в густонаселённых и хозяйственно освоенных районах. Особую тревогу вызывает потеря надёжности традиционных прогнозов, что требует безотлагательной модернизации методов расчёта и прогнозирования. Значительной проблемой становится доступ к современной гидрометеорологической информации. Полученные авторами результаты могут служить основой для разработки новых адаптационных мер,

направленных на минимизацию рисков и обеспечение устойчивого водопользования в условиях нестационарного климата.

Будущие изменения водного режима рек России в XXI веке: прогнозы и влияние на водную безопасность. Оценка возможных изменений водного режима рек в условиях прогнозируемого изменения климата является одной из ключевых задач, имеющей прямое отношение к обеспечению водной безопасности России. Согласно современным подходам, выделяют две основные группы оценок: (1) основанные на результатах моделирования гидрологических процессов непосредственно в климатических моделях и (2) основанные на расчётах с использованием гидрологических моделей (глобальных или региональных), на вход которых подаются данные климатических моделей [3]. В последние годы наблюдается сдвиг в методологии оценки гидрологических последствий прогнозируемого изменения климата — от оценок на основе климатических моделей к оценкам на основе региональных гидрологических моделей, которые позволяют моделировать характеристики водного режима рек за исторический период с большей точностью и оценивать их возможные изменения в будущем с меньшей неопределённостью [4].

Прогнозы изменения годового стока. Согласно данным ансамблевых экспериментов с климатическими моделями, наиболее значительные положительные аномалии среднегодового стока могут сформироваться на крупнейших реках бассейна Северного Ледовитого океана (бассейны Лены, Оби, Яны, Индигирки и Колымы). При наиболее жёстком сценарии антропогенного радиационного воздействия RCP8.5 положительные аномалии стока крупных сибирских рек могут превысить 30% [4]. Исследования показывают, что по данным климатических моделей, среднегодовой сток Оби, Енисея и Лены, осреднённый по ансамблю моделей, к концу века может вырасти на 15, 20 и 25% соответственно [3]. Наибольшие положительные аномалии в конце XXI века получены при сценарии RCP8.5 для реки Лены (34%), Енисея (27%) и суммарного стока рек Северо-Восточной Сибири (42%) [3]. Оценки, выполненные с использованием региональных гидрологических моделей, демонстрируют меньшую внутриансамблевую изменчивость по сравнению с климатическими моделями. Согласно прогнозам с использованием гидрологических моделей, для большинства рассмотренных рек ожидаются положительные аномалии годового стока, которые будут более выражены к концу XXI века. Положительные аномалии стока (по сравнению с 1971-2005 гг.) могут составить 10, 11, 20 и 34% к концу века для рек Таз, Северная Двина, Лена и Индигирка соответственно [3, 5]. Особенно заметный рост стока прогнозируется для крупных рек Восточной Сибири: Лены, Индигирки, Колымы [3]. Для реки Колымы, по данным

модели ECOMAG, годовой сток к концу века может увеличиться на 13.5-47.2% в зависимости от сценария [6]. Отрицательные аномалии среднегодового стока к концу XXI века прогнозируются для рек Оки, Селенги и Амура, при этом при высоком росте концентрации парниковых газов в атмосфере среднегодовой сток Селенги и Оки может сократиться более, чем на 20% по сравнению с историческим периодом. Для бассейна Дона и Кубани ожидается увеличение дефицита воды, что может потребовать планирования мер адаптации к этим изменениям [3].

Изменения максимального стока и внутригодового распределения. Прогнозы изменения максимального стока имеют критическое значение для оценки рисков наводнений. Согласно расчётам на основе климатических моделей, наиболее значительный рост максимального стока (до 80%) и увеличение максимальной площади затопления (на 3-5%) могут произойти на замыкающих створах крупных сибирских рек [3]. В юго-западных регионах России возможно снижение максимального стока талых вод на 10-30%, в то время как положительные аномалии максимального дождевого стока могут достигать 70% в регионах Центральной Сибири. Численные эксперименты с использованием модели ECOMAG показали возможное значительное увеличение максимального стока реки Лены в XXI веке. При наиболее жёстком климатическом сценарии RCP8.5 изменения максимального объёма стока Лены, превышающего среднесуточный расход 10%-ной обеспеченности, могут увеличиться до 70% к концу XXI века. Ожидается смещение весенне-летнего половодья на более ранние сроки, что приводит к увеличению стока в мае и росту общего объёма половодья [3]. Моделирование с использованием региональных моделей показывает существенные изменения внутригодового распределения стока. Для рек бассейна Северной Двины и Онеги прогнозируется уменьшение максимумов половодья, смещение сроков прохождения половодья на 15-35 дней ранее и увеличение меженного стока в течение года [4]. Для реки Оки характерны более раннее и низкое весеннее половодье, увеличение зимнего стока за счёт оттаивания почв и сокращение подземного питания рек в летне-осенний период. Для бассейна Селенги, крупнейшего притока Байкала, на протяжении всего XXI века ожидается уменьшение водности. Особенно быстрое снижение стока прогнозируется во второй половине века при сценариях RCP6.0 и RCP8.5, когда прогнозируемое сокращение стока на 20-40% по отношению к базовому периоду (1991-2005) превышает изменчивость прогнозов по ансамблю глобальных климатических моделей [4].

Неопределённость прогнозов и влияние на водную безопасность. Одной из фундаментальных научных проблем при использовании гидрологических моделей для

прогнозов воздействия климатических изменений является адекватная оценка неопределённости расчётных характеристик водного режима и поиск путей её снижения. Источники неопределённости этих характеристик связаны с разбросом расчётных траекторий будущего изменения климата, а также с неопределённостью, присущей самой гидрологической модели — её структуре, параметрам, заданию граничных условий. Показано, что неопределённость климатических прогнозов обычно превышает неопределённость гидрологического моделирования, хотя последнюю не следует недооценивать [3]. Для большинства бассейнов разброс оценок между различными моделями значительно превышает средние аномалии по ансамблю. Это создаёт серьёзные проблемы для принятия управленческих решений в области водного хозяйства. Отмечается, что региональные гидрологические модели, в отличие от глобальных, позволяют более полно учитывать разнообразие физических механизмов реакции гидрологической системы на климатическое воздействие, благодаря чему характеристики водного режима рек воспроизводятся с использованием ансамбля гидрологических моделей более точно, чем с ансамблем климатических моделей [4].

Таким образом, современные исследования показывают, что в XXI веке на большей части территории России ожидается увеличение годового стока, наиболее выраженное в северных и восточных регионах, и снижение стока в южных районах. При этом максимальный сток будет расти в Сибири и на Дальнем Востоке, создавая повышенные риски наводнений, в то время как на юге Европейской территории России возможно усиление дефицита водных ресурсов. Значительная неопределённость прогнозов требует дальнейшего совершенствования как климатических, так и гидрологических моделей, а также развития методов ансамблевого моделирования для повышения надёжности оценок, необходимых для планирования мер адаптации водного хозяйства к изменению климата.

Заключение. Изменение водного режима рек России под влиянием глобального потепления создаёт сложный комплекс вызовов для водной безопасности страны. С одной стороны, растут водные ресурсы северных и восточных регионов, что открывает новые возможности для хозяйственного освоения. С другой — усиливается дефицит воды в густонаселённых и экономически развитых южных и центральных районах, учащаются разрушительные наводнения, ухудшается качество воды, обостряются трансграничные проблемы. Необходима модернизация водохозяйственной инфраструктуры, внедрение современных методов управления водными ресурсами с учётом климатических прогнозов, развитие систем мониторинга и раннего

предупреждения опасных гидрологических явлений, а также международное сотрудничество в области трансграничных водных объектов.

Финансирование: работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-17-00084.

Список литературы

1. 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.

2. Варенцова Н. А., Киреева М. Б., Харламов М. А. и др. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. Обзор исследований // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – Т. 384, № 2. – С. 92–116.

3. Gelfan A. N., Gusev E. M., Kalugin A. S. et al. Runoff of Russian rivers under current and projected climate change: A review 2. Climate change impact on the water regime of Russian rivers in the XXI century // Water Resources. – 2022. – Vol. 49, no. 3. – P. 351–365.

4. Gelfan A. N., Frolova N. L., Magritskii D. V. et al. Climate change impact on the annual and maximum runoff of Russian rivers: Diagnosis and projections // Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics. –2023. –Vol. 59, no. 2. –P. 153–169.

5. Nasonova O. N., Gusev Ye. M., Kovalev E. E., Ayzel G. V., and Chebanova M. K. Projected changes in water balance components of 11 large river basins during the 21st century and their uncertainties // Water Resources. – 2021. Vol. 48, no. 5. - Pp. 666−675.

6. Lisina A. A., Krylenko I. N., Kalugin A. S., Motovilov Yu. G., Sazonov A. A., Frolova N. L. Assessment of the Kolyma Runoff under Current Climate Changes // Water Resources. – 2023. – Vol. 50, Suppl. 3. – Pp. S318–S322.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

***Болгов М.В.*[1,2]**
[1]ФГБУ РосНИИВХ, Ростов-на-Дону
[2]ФГБУН Институт водных проблем РАН, г. Москва
e-mail: bolgovmv@mail.ru

Аннотация: Рассматриваются задачи оценивания и моделирования гидрологических характеристик, возникающие при анализе вододеления и учете различных аспектов негативного воздействия вод на трансграничных объектах.

Обсуждаются последствия планируемых и реализованных проектных решений по управлению водными ресурсами трансграничного озера Ханка, озера Далай-Нур, Торейских озер.

Ключевые слова: водные ресурсы, трансграничные водные объекты, гидрологический режим, оценивание параметров, имитационное моделирование.

HYDROLOGICAL ASPECTS OF THE USE OF TRANSBOUNDARY WATER RESOURCES

***Bolgov M.V.*[1,2]**
[1]FSBI RosNIIVKh, Rostov-on-Don
[2]FSBSI Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow
e-mail: bolgovmv@mail.ru

Annotation: The paper examines the tasks of assessing and modeling hydrological characteristics that arise when analyzing water allocation and taking into account various aspects of the negative impact of water on transboundary water bodies.. The consequences of planned and implemented project solutions for managing water resources of the transboundary Lake Khanka, Lake Dalai-Nur, and the Torey Lakes are discussed.

Keywords: water resources, transboundary water bodies, hydrological regime, parameter estimation, simulation modeling.

Введение

Большую часть проблем, возникающих при планировании водохозяйственных мероприятий на водосборах и отдельных участках трансграничных рек составляют сложности при оценке и прогнозировании характеристик гидрологического режима водоемов и водотоков, используемых при согласовании разнообразных решений, принимаемых на уровне межгосударственных отношений.

Решение задач гидрологического расчета и прогноза в современных условиях сталкивается со сложностями не только для трансграничных рек. В последние годы наблюдаются климатически обусловленные изменения водного режима, само выделение которых и долгосрочный прогноз (расчет) не имеют однозначных рекомендаций. Связано это как с большой неопределенностью прогнозов изменений климата на ближайшие десятилетия, так и со значительными объемами антропогенного воздействия на водные ресурсы. Заметно сократилась в последние десятилетия и не развивается сеть мониторинговых наблюдений за водными ресурсами, не выполняются работы по обобщению сведений о гидрологическом режиме рек и озер, не актуализируются параметры расчетных схем, рекомендуемых нормативными документами, не развиваются новые подходы, обеспечивающие решение, например, водно-экологических задач и пр.

Отдельной проблемой использования водных ресурсов трансграничных объектов является отсутствие полноценного доступа к сведениям о гидрологическом режиме рек и озер на сопредельных территориях. Специалисты ограничены в доступе к полным архивам данных, что вызывает беспокойство по поводу надежности получаемых оценок стока и гидрологических прогнозов. Сказанное относится и к данным об использовании

водных ресурсов. В большинстве граничащих с Россией стран эти сведения не находятся в открытом доступе.

Российская Федерация имеет протяженную государственную границу, которая во многих случаях или проходит по рекам, или пересекает водные объекты. В этих случаях мы говорим о трансграничных водных объектах. В настоящее время, в сфере ответственности Росводресурсов, разработаны, подписаны и реализуются соглашения о порядке использования трансграничных вод со всеми соседними государствами. В большинстве случаев Сторонам удается найти согласованный подход к актуальным оценкам трансграничных водных ресурсов и к смягчению последствий хозяйственного использования вод. Но в некоторых случаях обсуждение проблем использования трансграничных вод может «затягиваться» на десятилетия, что связано как с особенностями гидрологического режима, так и с неопределенностями оценки последствий принимаемых Сторонами решений как для водных экосистем, так и для экономик государств, использующих водные ресурсы трансграничных рек с различными целями.

Из числа трансграничных водных объектов остановимся далее на ряде таких случаев, дискуссия по которым уже перешла из области двухсторонних дипломатических отношений на международный научный уровень. Сложность процедур межгосударственного согласования результатов объясняется не только упомянутыми выше причинами, но также и специфическими аридными климатическими условиями, для которых гидрологическая теория развита относительно слабо.

В аридных регионах, при выходе рек из горных областей, наблюдается транзит и рассеивание стока [1-3], а оставшаяся вода заполняет бессточные понижения, образуя замкнутые, или терминальные озера. Уровень воды таких озер сильно зависит от колебаний водности впадающих рек. По причине небольших уклонов дна размеры озер характеризуются большой амплитудой колебаний, вплоть до полного высыхания. Эффект антропогенного воздействия (в виде безвозвратных изъятий) на гидрологический режим озер может быть весьма существенным. Развитие орошения требует забора больших объемов вод, и в результате бессточным озерам может быть нанесен заметный ущерб, вплоть до их полного исчезновения.

Основная гидрологическая задача заключается в выборе и верификации стохастической модели многолетних колебаний стока рек, являющегося в исследуемом регионе основной приходной статьей в водном балансе озер. Для решения задачи прогнозирования уровней воды замкнутых водоемов важным является учет закономерностей чередования маловодных и многоводных лет, иными словами –

затяжных группировок лет повышенной и пониженной водности. Обобщение данных гидрологического мониторинга показывает, что в аридных областях отмечается существенное региональное увеличение коэффициента автокорреляции годового стока, который, в марковском случае, определяет вероятность возникновения упомянутых группировок [4, 5]. Основной практический вопрос – достаточно ли тех возможностей, которые предоставляет широко используемая в гидрологии простая Цепь Маркова для описания многолетних колебаний речного притока и других компонент водного баланса при прогнозировании изучаемых водных объектов?

Собственно научная проблема гидрологии состоит в том, что предложить генетически обоснованный механизм, объясняющий природу многолетних колебаний стока, пока еще не удается. Исследуются отдельные факторы и компоненты формирования водного баланса водосборов, обсуждается роль испарения, роль естественной зарегулированности стока за счет, например доли подземного питания, формулируются другие представления, которые могут, в принципе, объяснить псевдо-цикличность многолетних колебаний стока.

Влияние регулирующих сток факторов на характер его многолетних колебаний, на качественном уровне, очевидно, но возникает проблема недостаточности данных, которая ограничивает применение сложных вероятностных моделей. Собственно дилемма состоит в следующем: усложнять ли вероятностную модель стока для более адекватного вероятностного описания колебаний уровня замкнутых озер, или можно ограничиться некоторым увеличением параметров (первого коэффициента автокорреляции), что также скажется на вероятностях распределения уровней озер?

Практическая проблема состоит в том, что надо оценить вероятность группировок стока выше или ниже заданного уровня на основе коротких рядов наблюдений. Сеть пунктов гидрологических наблюдений в аридных регионах, как правило, недостаточна, ряды короткие, а механизмы формирования стока, по мере удаления от зоны его формирования, усложняются. И это в полной мере относится к замкнутым озерам Центральной Азии. Дальнейшее изложение материала представляет собой обзор гидрологических и водохозяйственных результатов, полученных в последние годы в области использования водных ресурсов трансграничных рек и озер.

Ссылки на гранты, темы и благодарности

Результаты исследования частично получены в рамках Государственного задания ИВП РАН. Шифр темы: № FMWZ-2025-0001.

Автор выражает признательность д-ру геогр. наук Георгиевскому В.Ю., канд. геогр. наук Кашницкой М.А., чл.-корр. РАН, д-ру геогр. наук Фроловой Н.Л., а также

всем другим коллегам, чье участие при подготовке цитируемых статей было существенным вкладом в решение поставленных задач.

1. Водные ресурсы бассейна р. Хайлар и управление озером Далай-Нор

Водохозяйственная обстановка на Верхнем и Среднем Амуре, характеризуется нарастающим дефицитом водных ресурсов, ухудшением качества вод трансграничных водных объектов, возникновением взаимных территориальных претензий в результате воздействия на русловые процессы, и в целом усилением антропогенной трансформации природных экосистем [6, 7].

Начиная с 2009 г. на территории КНР осуществляется проект переброски части стока р. Аргуни (Хайлар) в оз. Далайнор, в самом бассейне р. Хайлар планируется строительство нескольких водохранилищ для целей гидроэнергетики, ирригации и хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения. Очевидно, что эти мероприятия приведут к снижению объемов стока Аргуни на территории Российской Федерации и трансформации ее водного режима.

Для урегулирования этой трансграничной проблемы необходима оценка последствий реализации возможных вариантов развития водохозяйственного комплекса р. Аргунь (включая бассейны р. Хайлар и оз. Далайнор) на ее водный режим. Река Аргунь (в пределах КНР — р. Хайлар) берет начало на западном склоне Большого Хингана. На 669-м километре Аргунь вступает в пределы Российской Федерации и далее является естественной линией границы между Россией и Китаем. Большая часть бассейна реки расположена на территории КНР (рис. 1). Регион характеризуется низкой водностью. В бассейне р. Керулен модуль стока составляет 0,2 л/(с·км^2), а в Забайкальской части водосбора Аргуни — 2,8 л/(с·км^2). Реки Монголии и Китая (Керулен, Оршон-Гол) характеризуются уменьшением стока по направлению к устьевым створам за счет потерь на испарение и фильтрацию из русел в теплый период года [3, 8].

В ряду величин годового стока Аргуни достаточно четко прослеживается квазицикличность колебаний стока. Последний полный цикл изменения водности начался в 1964 г. Маловодная его фаза продолжалась до 1981 г. (18 лет). С 1982 по 1999 г. отмечалась многоводная фаза, продолжительность которой так же составила 18 лет. С 2000 г. началась маловодная фаза. В целом аридные регионы характеризуются наличием продолжительных циклов в колебаниях водности, и чем засушливее регион, тем более продолжительны циклы, по крайней мере в рассматриваемой географической зоне.

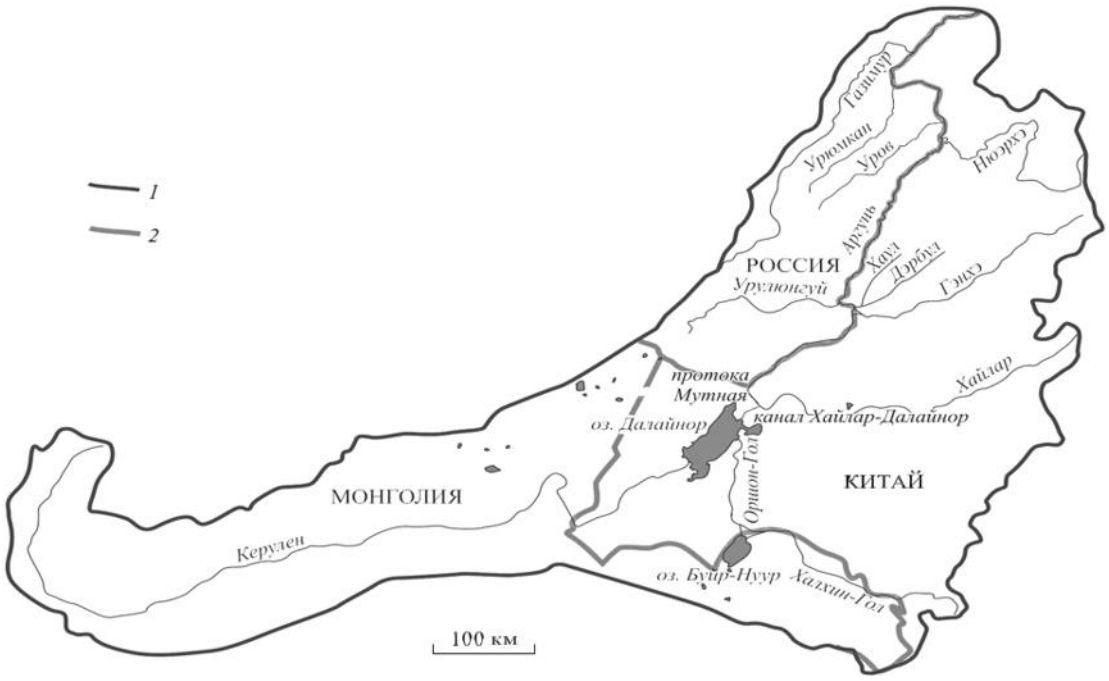


Рис. 1 - Гидрографическая схема Аргуни [9].
Границы: 1 — бассейна реки, 2 — государственная граница.

Заметное снижение уровня воды оз. Далайнор началось в 2000 г. (с 544,8 м в 1999 г. до 541,45 м в 2007 г.). За восемь лет снижение уровня воды составило 3,35 м, а площадь водной поверхности уменьшилась с 2293,6 до 1800 км^2. Объем воды в озере сократился на 6,86 км^3. Для предупреждения негативных изменений в экосистеме озера, а также обеспечения потребности в воде горнорудного производства, тепловых электростанции, коммунального водоснабжения, был задуман и реализован проект перераспределения стока р. Хайлар в оз. Далайнор. Проект предполагает, что примерно через 5–15 лет после строительства канала уровень воды в озере стабилизируется на отметке 544,8 м. После достижения этого уровня водозабор из Аргуни будет компенсироваться поступлением воды в реку из оз. Далайнор через канал Синькайхэ. В проектной документации отмечалась необходимость «удержания» уровня озера внутри интервала ±20 см от проектного уровня. Объем переброски стока воды в оз. Далайнор составит примерно 1 км^3/год. Поскольку сток р. Хайлар в районе головного сооружения канала равен 3,5 км^3/год (в маловодные годы — 1,5 км^3/год), то в канал предполагается поступление до 60–75 % стока Аргуни. Пропускная способность канала оценивается в 70–93,6 м^3/с. Предусматривалось, что забор стока будет осуществляться пропорционально имеющимся водным ресурсам и не превысит 28–30 % среднегодового стока реки.

Метод оценки последствий решения данной водохозяйственной проблемы заключается в выполнении водохозяйственных расчетов способом имитационного

эксперимента. Для этой цели осуществляется моделирование продолжительных временных рядов притока к озеру и стока рек, и на основе балансовой модели рассчитываются объемы переброски стока, наполнения озера и сток р .Аргунь. Результаты расчетов показывают, что при существенном развитии водопотребления в китайской части бассейна р. Аргунь последствия для гидрологического режима могут быть значительными. Рассмотрение различных вариантов водопотребления показало следующее. Наихудшая ситуация возникает при реализации КНР программы водохозяйственного строительства в бассейне р. Хайлар в полном объеме. Максимальный сток летних месяцев, обеспечивающий режим обводнения поймы р. Аргунь, может сократиться на 30–40 % в маловодные годы. Такой вывод базируется только на учете безвозвратных потерь. При учете характера регулирования (сезонного перераспределения стока) в бассейне р. Хайлар, снижение максимального стока будет еще более существенным, тем более что некоторые емкости создаются в целях реализации противопаводковых мероприятий.

Расчеты показали, что переброска стока в Далайнор приведет к явно нестационарному режиму колебания уровня воды в озере (и режима стока р. Аргунь) в процессе его наполнения в течение первых 10–15 лет после ее начала. В этот период наполнения озера ущерб водным ресурсам Аргуни будет существенно больше, нежели после стабилизации уровня в диапазоне проектных значений. Средняя продолжительность наполнения озера до проектных отметок составит примерно 14 лет. По мере наполнения озера объем переброски уменьшится с 1,1 км^3/год до 0,2–0,3 км^3/год через 14–15 лет (рис. 2). Ситуация стабилизируется через 12–15 лет с момента начала функционирования канала.

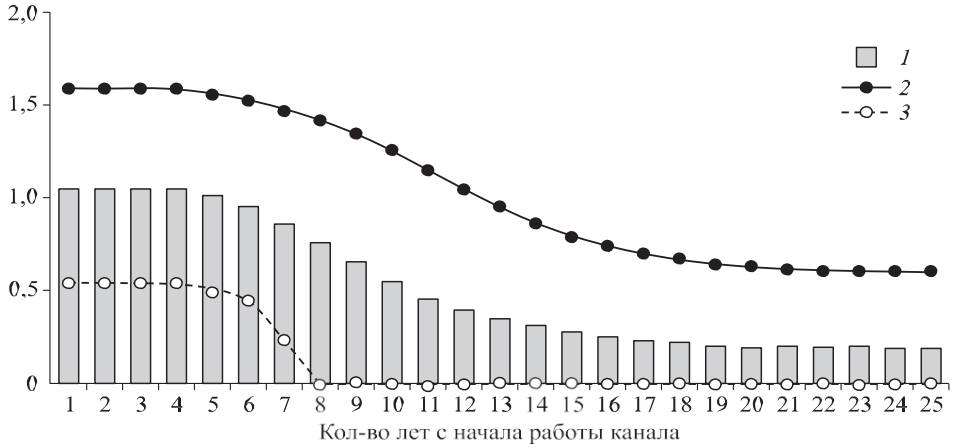


Рис. 2 - Изменение объема переброски стока по каналу Хайлар–Далайнор (W, км^3/год)[9]
1 — средние условия; 2 — 10 %-ная обеспеченность; 3 — 90 %-ная обеспеченность

Интересно оценить последствия принятого проектного решения для водного режима озера. Поскольку данные о гидрологическом режиме китайских озер в

открытом доступе отсутствуют, обратимся к имеющимся публикациям в научных изданиях. В работе [10] приведены в графической форме основные элементы баланса озера за 60 лет. Из представленных в этой работе графиков видно, что сразу после начала работы канала переброски уровенный режим озера Далайнор стабилизировался, а затем, после начала исключительно многоводного периода, резко вырос. Произошло это потому, что схема управления уровнем воды в озере не предусматривала мероприятий по сбросу излишков воды из озера.

2. Особенности гидрологии Торейских озер и нижнего течения трансграничной реки Ульдза

Торейские озера – это сложная бессточная система, состоящая из двух соединенных протокой водоемов Барун-Торей и Зун-Торей, расположенных в южной части Забайкалья на границе с Монголией (рис. 3). Водоемы имеют непостоянный гидрологический режим, обусловленный изменениями климата и связанными с ними изменениями притока воды. Большая изменчивость уровня воды в озерах значительно влияет на состояние всего экологического региона Торейских озер. В июле 2020 г. в монгольской части бассейна реки Ульдза, являющейся основным притоком Торейских озер, без согласования с Россией, началось строительство водохозяйственного объекта, который может оказать значительное влияние на состояние озер.



Рис. 3 - Схема расположения Торейских озер, трансграничного водосбора и строящего гидротехнического сооружения [11]

Глубина озера Барун-Торей относительно небольшая – около 4 м, длина 50,5 км, средняя ширина 11,1 км, площадь водной поверхности достигает 600 км^2. В годы повышенного увлажнения озеро разливается, а в засушливые годы почти полностью высыхает. На восточном берегу озеро Барун-Торей соединяется протокой с озером Зун-Торей, не имеющим притоков. Максимальная глубина озера Зун-Торей составляет около 7 м, площадь водной поверхности – 300 км^2. Поступление воды из озера Барун-Торей в Зун-Торей по соединяющей протоке начинается при уровне воды в Барун-Торее 596,1 м БС. Основным источником питания Торейских озер является трансграничная река Ульдза (монгольское название Улдз). Площадь водосбора – 26 900 км², 95 % из которых приходится на территорию Монголии.

Особенностью гидрометеорологического режима Торейских озер и прилегающей территории является выраженное чередование многоводных и маловодных климатических периодов [11]. Эти колебания обуславливают затяжные группировки в колебаниях водности рек, и, соответственно, уровней воды в озерах. В засушливые маловодные периоды высыхают не только небольшие водоемы на рассматриваемой территории, но и Торейские озера. Отметим, что по спутниковым данным в период 2009-2020 гг. регулярно отмечалось практически полное высыхание котловины озера Барун-Торей, а с 2017 – озера Зун-Торей. Относительно стабильное наполнение озера Барун-Торей началось в сентябре 2020 г. [12].

Для обработки нестационарных последовательностей в соответствии с действующим нормативным документом [13] предлагается подход, основанный на составных кривых обеспеченности, или, в терминах теории вероятностей, смеси распределений, каждая компонента которой описывает распределение вероятностей стока за период с однородными условиями формирования. При построении смеси распределений получается решение в виде одномерного распределения, которое используется для решения задачи определения расчетного расхода воды. При расчетах регулирования стока или прогнозирования уровней озер смеси одномерных распределений недостаточно. Имитируемая последовательность должна воспроизводить чередующиеся периоды водности в соответствии с выявленными нарушениями однородности ряда притока и возможными прогнозами будущего гидрологического режима. Для этой цели стохастическую модель многолетних колебаний стока необходимо усложнить.

В стационарном случае нормативные документы рекомендуют применение марковской модели многолетних колебаний речного стока. В нестационарном случае

алгоритм имитационного моделирования должен основываться на более сложной стохастической модели временного ряда, и в данном случае может быть рассмотрена полумарковская модель случайного процесса.

В отличие от многолетних колебаний температур воздуха, в речном стоке наблюдается “пороговый” характер изменений водности. В рядах стоковых характеристик выделяются два периода, в пределах которых колебания могут рассматриваться как условно-стационарные. В работах [14, 15] обоснована гипотеза, согласно которой случайный процесс колебаний стоковой характеристики скачкообразно переходит из одного состояния в другое, и основная задача прогноза состоит в оценке временного периода, в пределах которого сохранится новый, условно стационарный режим.

Для описания случайных процессов, скачкообразно меняющих свое состояние, применим класс полумарковских процессов, при котором вероятность перехода в новое устойчивое состояние зависит только от одного, предшествующего состояния процесса, а в пределах стационарного участка процесс описывается стационарной марковской моделью с заданным безусловным законом распределения. В рассматриваемом случае (Торейские озера) мы располагаем только двумя состояниями процесса, вероятность реализации каждого из них принимается пропорциональной их продолжительности.

Статистический анализ рядов исходной информации показал, что ряд суммарного годового притока рек Ульдза и Ималка характеризуются значительной внутрирядной связностью. Первый коэффициент автокорреляции рядов годового стока рек Ульдза и Ималка составляет 0,6. Оценка автокорреляционной функции указывает на существенные отклонения колебаний притока от традиционно принимаемой в гидрологических расчетах Марковской модели этого процесса, на наличие циклических колебаний во временном ходе годового стока. Для учета этих особенностей моделирование годовых значений притока к Торейским озерам выполним в несколько этапов:

1. В ряду годовых значений притока к Торейским озерам выделим многоводные и маловодные фазы водности. В период с 1965 по 2018 гг. в ряде данных суммарного годового стока рек Ульдза и Ималка многоводная фаза длилась с 1984 по 1999 гг. и составила 16 лет. А маловодная фаза в имеющемся ряде данных наблюдалась дважды – в период с 1965 по 1983 гг. и с 2000 по 2018 гг.

2. Определим параметры распределения вероятностей рядов годового стока за разные фазы водности (табл. 1);

3. Выполним моделирование искусственных последовательностей годовых значений притока с параметрами, характерными для разных фаз водности по схеме простой цепи Маркова.

4. Образуем комбинированный ряд длиной 10000 лет путем комбинации двух последовательностей, смоделированных на предыдущем шаге отдельно для многоводных и маловодных лет. Для этой цели последовательно, из обоих рядов данных, выбираются отрезки длиной 16 и 19 лет для многоводной и маловодной модели соответственно. Полученные отрезки образуют временной ряд, в котором будет наблюдаться смена фаз водности в соответствии с заданными параметрами (продолжительность фаз водности и параметры распределений стока за каждую фазу).

5. Полученный комбинированный ряд притока используем в водобалансовой модели, с помощью которой осуществим расчет уровенного режима Торейских озер за период 10000 лет.

Искусственные последовательности рядов данных осадков и испарения на водную поверхность Торейских озер моделируются независимо по причине малых значений соответствующих парных корреляций. Водобалансовая модель, подробно описанная в работе [11] учитывает морфометрию озер, дополнительные потери на фильтрацию и рассеивание стока в дельтовой зоне. На рис 4. представлены кривые обеспеченности среднегодовых уровней Торейских озер, рассчитанные с использованием трех разных способов восстановления уровня озера: восстановленный по притоку, испарению и осадкам ряд длиной 54 года, восстановленный по аналогам (р. Шилка) ряд длиной 122 года, и рассчитанный методом имитационного моделирования ряд длинной 10000 лет. Параметры распределения уровней воды в озере по данным наблюдений и имитационного моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 1 – Параметры распределения вероятностей рядов годового притока Торейских озер за разные фазы цикла водности

Приток Торейских озер	Параметры распределения вероятностей				
	N, лет	Среднее, $м^3$	C*v*	C*s*/C*v*	r(1)
Весь ряд данных	54	$186,4*10^6$	1,39	1,45	0,60
Многоводный период	16	$490,0*10^6$	0,60	1,1	0,00
Маловодный период	38	$58,4*10^6$	1,13	1,1	0,85

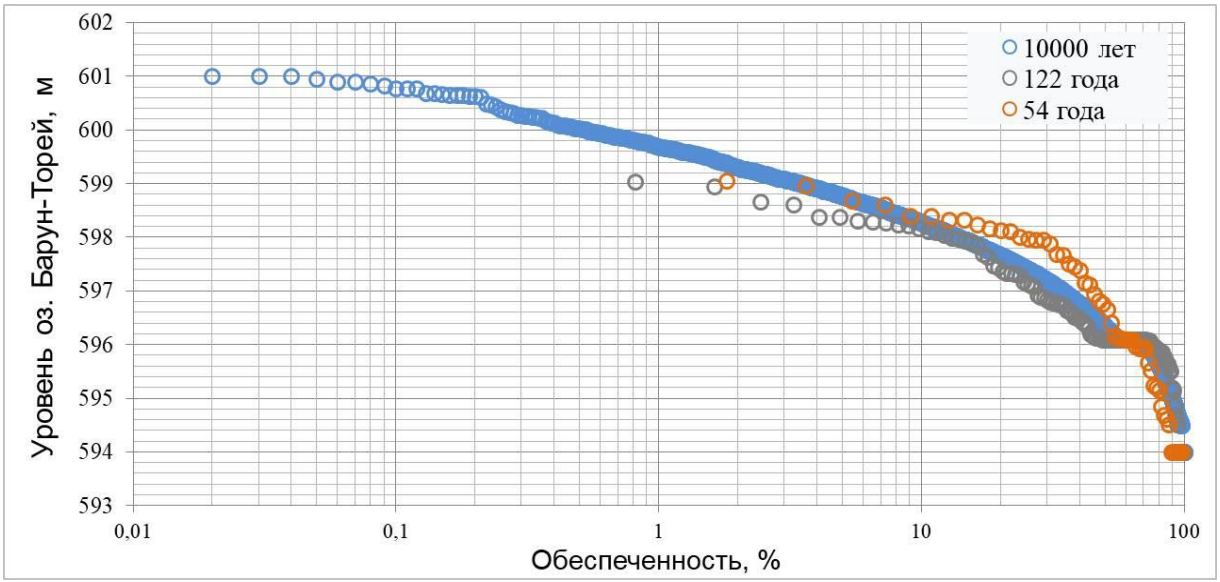


Рис. 4 - Совмещенные кривые обеспеченности по наблюденным, восстановленным и смоделированным данным уровней озера Барун-Торей

Таблица 2 – Параметры распределения вероятностей измеренных и смоделированных рядов уровней озера Барун-Торей

Параметр распределения вероятностей	54 года	10000 лет
Среднее	596,6	596,6
Среднее квадратическое отклонение	1,5	1,2
Соотношение Cs/Cv (асимметрия)	-1,15	1,15
Первый коэффициент автокорреляции R (1)	0,97	0,96

В заключение раздела надо отметить, что измеренные величины притока представляют собой, так называемый бытовой сток, который, в неизменных условиях эксплуатации водохозяйственной системы, может быть описан вероятностными методами (в частности, марковскими моделями). При отсутствии сведений о водопотреблении на сопредельных территориях, такой подход представляется приемлемым.

3. Экстремальные уровни воды в трансграничном озере Ханка

Сложная ситуация сложилась на побережье озера Ханка, являющегося крупнейшим внутренним водоемом в регионе, к тому же имеющим статус трансграничного водного объекта[16]. Уровень воды в озере растет в последние годы, что требует как научного объяснения происходящего, так и разработки мероприятий, направленных на снижение опасности развития негативных процессов.

Для прогнозирования уровня воды и обоснования комплекса водохозяйственных мероприятий на озере Ханка и его водосборе, в целях управления его уровенным

режимом, необходимо обладать сведениями о компонентах водного баланса водоёма. Эффективным методом получения прогноза уровня озера является моделирование колебаний уровня водоема на основе уравнения водного баланса и вероятностных моделей колебаний его составляющих – притока, осадков и испарения. Расходная составляющая водного баланса - сток из озера через р. Сунгач, известен недостаточно точно, поскольку регулярных наблюдений за стоком реки в истоке в последние десятилетия не проводилось.

В настоящем исследовании в рамках разработки стохастической модели колебаний уровня озера использован метод моделирования искусственных последовательностей, необходимых для выполнения имитационных экспериментов, в ходе которых оцениваются последствия реализации различных водохозяйственных мероприятий. На основе предложенного метода осуществлено моделирование последовательностей годовых значений для всех составляющих элементов водного баланса оз. Ханка.

Реализации выходного процесса (т.е. уровенного режима озера и связанного с ним расхода р. Сунгач) получаются с помощью решения уравнения водного баланса озера в конечно-разностной форме с использованием морфометрической зависимости $F(H)$ и зависимости расхода от уровня озера $Q(H)$ для оз. Ханка, где . F-площадь озера, H-уровень воды в озере, Q – расход вытекающей из озера реки.

Расчеты водного баланса выполнялись в условиях четырех вариантов водопользования, включающих различные условия оттока из озера и сценарии использования стока р. Мулинхэ (табл. 3). Результаты моделирования уровня для разных вариантов приведены в табл. 4.

Таблица 3 - Варианты различных условий оттока из озера и сценариев использования стока р. Мулинхэ для моделирования уровня воды в озере Ханка

Вариант	Режимы использования водных ресурсов (сценарии)	Отметка порога (бара) в истоке р. Сунгач, см над нулем графика
1	Естественный режим	125
2	Естественный режим	180
3	Переброска стока р. Мулинхэ и забор воды из оз. Ханка	125
4	Переброска стока р. Мулинхэ и забор воды из оз. Ханка	180

Таблица 4 - Результаты динамико-стохастического моделирования уровня воды в оз. Ханка для различных вариантов расчета

Параметры распределения уровня	Варианты (в соответствии с таблицей 1)			
	1	2	3	4
Средний уровень озера, м	68,75	69,02	69,24	69,77
Среднее квадратическое отклонение, σ	0,54	0,52	0,85	0,82

Смоделированные искусственные ряды притока, испарения и осадков делились на отрезки по 50 лет, и расчет будущих значений уровня многократно повторялся при одном и том же начальном наполнении озера (69,9 м БС), соответствующем состоянию озера на 01.01.2016 г. Полученные значения уровня воды в озере Ханка с заблаговременностью до 50 лет обеспеченности 1% приведены на рис. 5 для различных вариантов расчетов. Прогнозные кривые распределения для всех четырех вариантов расчета 50%-ной обеспеченности приведены на рис. 6.

Важный вывод состоит в том, что уровенный режим озера в существенной мере определяется условиями стока из озера, что и определяет направление разработки мероприятий по снижению максимальных уровней воды в озере.

Одна из причин современного роста уровня озера Ханка – это переброска стока р. Мулинхэ в бассейн озера Малая Ханка и затем в озеро Ханка по системе каналов, емкостей и регулирующих гидротехнических сооружений. Переброска осуществляется в целях борьбы с наводнениями в низовьях р. Мулинхэ и для обеспечения водой рисовых оросительных систем (РОС). Перебрасываемая вода частично подаётся на РОС и затем в основном сбрасывается в р. Сунгач. Оставшийся сток накапливается в МалойХанке и, при превышении некоторого заданного уровня воды в Малой Ханке, сбрасывается в оз. Ханка, приводя к росту его уровня. Таким образом, основное мероприятие заключается в сокращении непосредственного сброса паводочных вод в озеро и перенаправлении части паводочного стока непосредственно в р. Сунгач.

Другой возможный подход к регулированию уровня воды в озере заключается в увеличении пропускной способности каналов и водотоков, осуществляющих сброс воды из озера Ханка. Река Сунгач является трансграничным водным объектом, и поэтому для этой цели рекомендуется восстановление пропускной способности существующего канала.

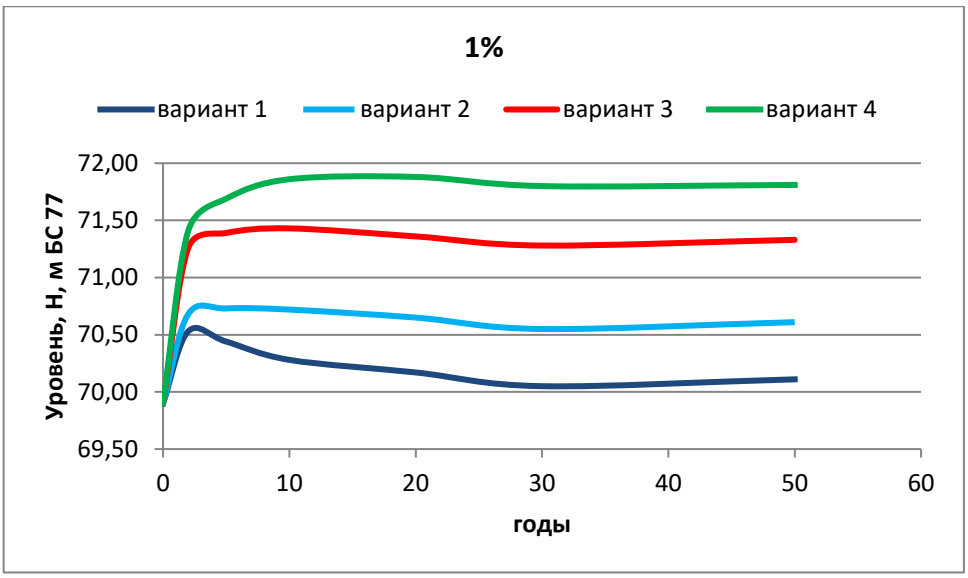


Рис. 5 – Прогнозное значение уровня вероятностью 1% при различной заблаговременности прогноза для разных сценариев водопользования

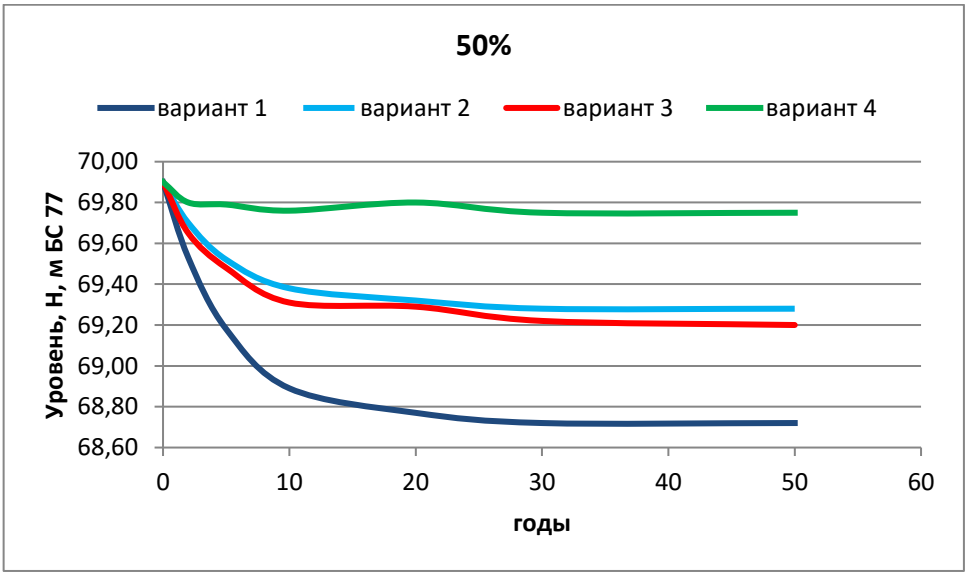


Рис. 6 – Среднее значение прогнозного уровня воды озера Ханка для разных сценариев водопользования

Результаты водохозяйственных и гидрологических расчетов показывают, что наблюдающийся в последние годы подъем уровня воды о озере Ханка является следствием как повышенной водности, т.е. обусловлен естественными колебаниями увлажнения в регионе, так и результатом антропогенного воздействия, а именно переброски части стока р.Мулинхэ, чей водосбор расположен на территории Китайской народной республики за пределами бассейна озера.

Заключение

Рассмотренные задачи использования водных ресурсов трансграничных рек и озер, расположенных в сложных гидрометеорологических условиях, указывают на необходимость развития методической базы получения оценок этих ресурсов и процедур межгосударственного согласования планов водопользования.

Возникающие проблемы вододеления обуславливают необходимость дальнейшего развития мониторинга состояния трансграничных водных объектов, доступа к имеющимся материалам наблюдений, в особенности на сопредельных территориях.

Отдельной проблемой являются климатические изменения речного стока, учет и прогноз которых требуют разработки новых научных подходов, и это проблема всей инженерной гидрологии, а не только трансграничных водных объектов.

Список литературы

1. Кузнецов Н. П. Воды Центральной Азии. – Москва: Наука, 1968. – 272 с.

2. Большаков М. Н. Водные ресурсы рек Советского Тянь-Шаня и методы их расчета. – Фрунзе: Илим, 1974. – 306 с.

3. Болгов М.В. Дождевые паводки на водотоках МНР // Метеорология и гидрология. – 1985. – №6. – С. 51–57.

4. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 256 с.

5. Болгов М.В., Лобода Н.С., Николаевич Н.Н. Групповая оценка параметров стохастических моделей стока // Метеорология и гидрология. – 1993. – №7. – С. 112–124

6. Соколов А. В., Шаликовский А. В. Механизмы совместного управления водными ресурсами в бассейне р. Аргунь для обеспечения гидроэкологической безопасности // Материалы междунар. конференции. — Чита: ЗабГГПУ, 2007. — С. 287–292.

7. Соколов А. В., Шаликовский А. В. Трансграничные водохозяйственные проблемы верховьев реки Амур // Водн. хоз-во России. — 2007. — № 4. — С. 66–73.

8. Гармаев Е.Ж., Болгов М.В., Аюржанаев А.А., Цыдыпов Б.З. Водные ресурсы Монголии и их современное состояние. Метеорология и гидрология. – 2019. – № 10. – С. 40-49.

9. Болгов М. В., Фролова Н.Л. Водный режим реки Аргунь и озера Далайнор в условиях антропогенного воздействия. География и природные ресурсы, 2012, №4,- С.21-29.

10. Biao SunBiao, SunZhiyan, YangShengnan at all. Water Balance Analysis of Hulun Lake, a Semi-Arid UNESCO Wetland, Using Multi-Source Data. April 2023. Remote Sensing 15(8):2028 DOI: 10.3390/rs15082028.

11. Кашницкая М.А., Болгов М.В. Бессточные Торейские озера: можно ли дать прогноз изменений гидрологического режима? // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 5. – С. 95–98.

12. Кашницкая М.А. Исследование динамики площадей водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья на основе данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 242–253.

13. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству определение основных расчетных гидрологических характеристик, Госстрой России, Москва, 2004, 73 с.

14. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 3. – С. 75–85.

15. Болгов М.В. Байесовская оценка точки нарушения однородности в последовательностях коррелированных случайных величин гидрометеорологических характеристик // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 10. – С. 27–35.

16. Георгиевский В.Ю., Болгов М.В., Католиков В.М., и др. Водный баланс озера Ханка и его изменения под влиянием природных и антропогенных факторов (монография), Государственный гидрологический институт Санкт-Петербург, 2022, 272 с.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ ВОДОДЕФИЦИТНЫХ РЕГИОНОВ

Шевченко В.А., ***Дедова Э.Б.,*** ***Исаева С.Д.****, Дедов А.А.*
ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Москва, Россия
E-mail: dedova@vniigim.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности влияния климатических изменений и техногенной нагрузки на последствия развития экологической ситуации в южных регионах бассейна Каспийского моря. В складывающихся условиях первостепенное значение имеет проведение комплексного экологического мониторинга интегрированного управления водохозяйственно-мелиоративным комплексом. Разработана концептуальная модель интегрального обоснования перераспределения водных ресурсов для повышения водообеспеченности регионов Нижней Волги, Дона и Северного Прикаспия до 2050 – 2070 гг. На ее основе в ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова выполняется формирование Стратегии повышения водообеспеченности сельскохозяйственного водоснабжения южных территорий на основе частичного перераспределения стока северных рек.

Ключевые слова: концептуальная модель, водные ресурсы, интегрированное управление, мелиоративно-водохозяйственный комплекс, водообеспеченность, перераспределение стока

CONCEPTUAL MODEL OF INTEGRAL JUSTIFICATION OF WATER RESOURCES REDISTRIBUTION TO INCREASE WATER AVAILABILITY IN WATER-SCARCITY REGIONS

Shevchenko V.A., Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences
***Dedova E.B.**, Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences*
***Isaeva S.D**. Doctor of Technical Sciences*
Dedov A.A., Candidate of Agricultural Sciences
All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russia
E-mail: contact@vniigim.ru

Annotation: The article examines the specific features of the impact of climate change and anthropogenic pressure on the consequences of the development of the ecological situation in the southern regions of the Caspian Sea basin. Under the current conditions, conducting comprehensive environmental monitoring and integrated management of the water management and reclamation complex is of paramount importance. A conceptual model has been developed for the integrated justification of the redistribution of water resources to increase water supply in the regions of the Lower Volga, the Don, and the Northern Caspian region until 2050–2070. Based on it All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, is developing a strategy to increase the water availability of agricultural water supply in the southern territories based on partial redistribution of the flow of northern rivers.

Keywords: increasing water availability, redistribution of water resources, conceptual model, integrated management.

В засушливых и полузасушливых регионах планеты проживает около 85% населения, при этом значительная часть которых сталкивается с дефицитом пресной воды. По прогнозам ООН, к 2050 году около 80% стран мира окажутся в зоне водного стресса. Следует отметить, что согласно классификации Фалькенмарка, “водный стресс начинает проявляться при снижении обеспеченности стран ниже 1700 м³ пресной воды на душу населения в год, при уровне ниже 1000 м³ страна классифицируется как испытывающая водный стресс, а при значении ниже 500 м³ – как находящаяся в условиях абсолютного дефицита воды” [1].

Адаптация к климатическим изменениям, включая усиление засушливости и изменение режима осадков, стала одной из ключевых задач глобальной повестки устойчивого развития мирового сообщества. На территории России особенно остро эта проблема стоит в регионах юга европейской части - в Астраханской, Волгоградской, Ростовской областях, Республике Калмыкия, Крыму, Краснодарском и Ставропольском краях, традиционно ориентированных на сельскохозяйственное производство [2,3]. Эти территории являются важнейшими зонами продовольственной безопасности страны, обеспечивая значительную часть производства зерна, овощей, винограда и животноводческой продукции [4,5]. В южных регионах России наблюдается устойчивая тенденция к снижению обеспеченности водными ресурсами, что связано с проявлением климатической нестабильности - увеличение среднегодовых температур, сокращение

количества атмосферных осадков, рост частоты и продолжительности засух, а также испаряемости.

Сельское хозяйство должно быть адаптировано к заметному росту температур и развитию аномальных температурных явлений [6]. Это требует внедрения климатически устойчивых практик. Прогнозы потепления климата подтверждены исследованиями ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» [7,8]. Статистический анализ климатических данных за период от 30 до 130 лет по 15 метеостанциям, расположенным в уязвимых регионах (юг Европейской России, Западная Сибирь, Южный Урал, Дальневосточный федеральный округ), выявил значимые линейные тренды роста температуры приземного слоя воздуха. В то же время изменение количества осадков описывается полиномиальными моделями 3–5 степени, что указывает на нелинейный, но закономерный характер их изменений — с тенденцией к смещению пиковых осадков во времени и увеличению числа маловодных лет.

Особую тревогу вызывает ситуация в регионе Северо-Западного Прикаспия, где дефицит водных ресурсов усугубляется существенным снижением уровня Каспийского моря [9-17]. За последние десятилетия уровень моря понизился на более чем 1,5 метра, что ведёт к деградации прибрежных экосистем, снижению биопродуктивности, ограничению водозаборов и ухудшению качества орошения. Это напрямую влияет на устойчивость сельскохозяйственных систем и требует комплексных мер по водообеспеченности, рекультивации земель и внедрению адаптивных технологий.

В этих условиях повышение водообеспеченности засушливых территорий становится не просто экономической, а стратегической задачей. Она необходима для:

— обеспечения продовольственной безопасности страны;

— поддержания социально-экономической стабильности в регионах;

— сохранения аграрного потенциала и предотвращения миграции из сельской местности.

Устойчивое развитие сельского хозяйства в условиях растущего дефицита водных ресурсов невозможно без системного подхода, объединяющего науку, технологии и государственную политику. Только комплексные меры позволят обеспечить продовольственную независимость и экологическую устойчивость страны в XXI веке.

ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» в рамках выполнения Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и реализации Программы по комплексному изучению Каспийского моря и его водосборного бассейна разработана концептуальная модель интегрального обоснования мер по повышению водообеспеченности южных регионов России за счёт частичного перераспределения речного стока между бассейнами.

Цель работы — разработка научно обоснованной долгосрочной модели повышения водообеспеченности южных территорий Российской Федерации на период до 2050–2070 годов с учётом трёх ключевых аспектов - *экологической устойчивости*, *социально-экономической целесообразности*, *прогнозируемых климатических изменений*. Основная задача — обеспечение нормализации водного баланса в регионах Нижней Волги, бассейна Дона и Северного Прикаспия, находящихся в условиях хронического вододефицита и многолетнего снижения речного стока, вызванного как антропогенной нагрузкой, так и изменением климата.

Результаты исследований могут быть положены в основу разработки Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях глобального потепления и способствовать интеграции научных данных в государственное планирование водными ресурсами.

При разработке проекта применялись цифровые технологии, инновационные методы моделирования и современные инженерные решения. На основе комплексного анализа гидрологических, экологических, социально-экономических и климатических данных была создана Концептуальная модель интегрального обоснования перераспределения водных ресурсов. Визуализация ключевых элементов модели представлена на рис. 1.

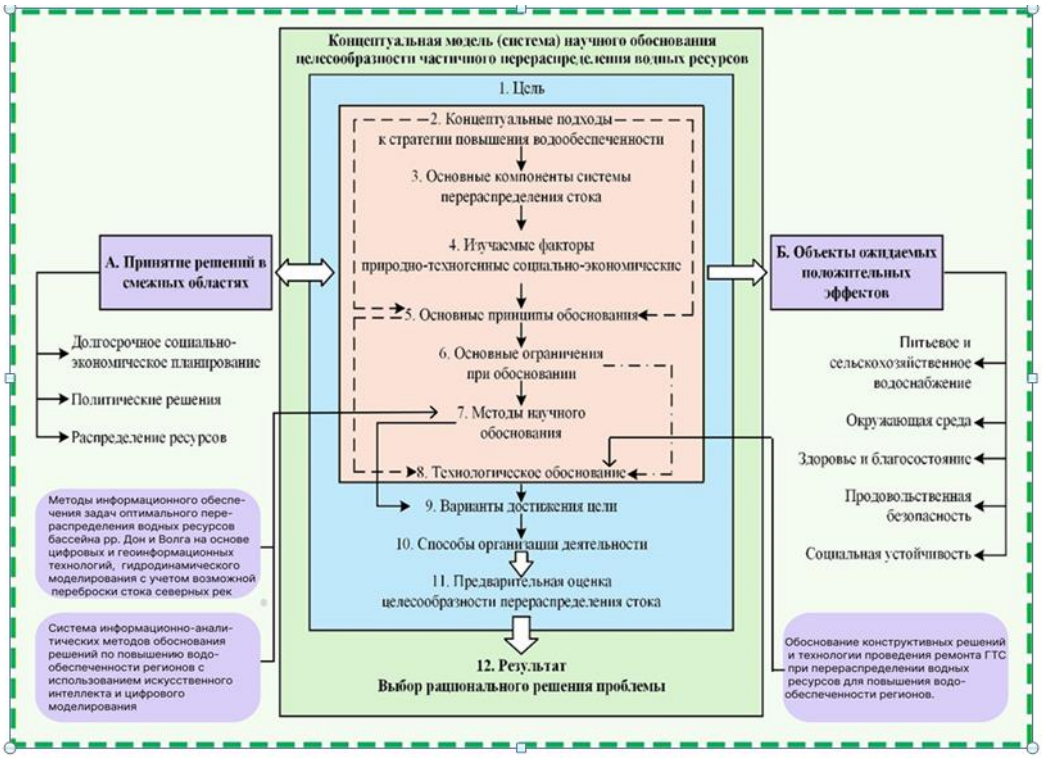


Рис. 1 - Концептуальная модель интегрального обоснования перераспределения водных ресурсов для повышения водообеспеченности южных регионов на основе частичного перераспределения стока северных рек

Цель концепта частичного перераспределения водных ресурсов заключается интегральном обосновании и разработке устойчивой, экологически безопасной и социально значимой системы водопользования, адаптированной к реалиям XXI века: новым технологиям, климатическим изменениям и потребностям миллионов людей к чистой воде. Модель включает рассмотрение: концептуальных подходов к разработке стратегии повышения водообеспеченности; основных природно-техногенных и социально-экономических факторов в пределах речных бассейнов, входящих в систему перераспределения стока; принципов обоснования экологически безопасного перераспределения стока между водосборными бассейнами; принимаемых ограничений; методов научного и технологического обоснования частичного перераспределения стока; сценарных исследований для рассмотрения вариантов достижения цели; рациональных решений для достижения целей.

Модель предполагает интеграцию социально-экономических подходов, математического моделирования и цифровых технологий, что позволит сформировать региональные Стратегии повышения водообеспеченности сельскохозяйственного водоснабжения южных территорий на основе частичного перераспределения речного стока. Методология обоснования частичного перераспределения стока северных рек базируется на системном подходе, экспертных и аналитических оценках, а также на применении методов программно-целевого планирования, нексус-подхода, SWOT-анализа, статистического анализа, сценарного моделирования и натурных исследований. Особое внимание уделяется использованию цифровых технологий и искусственного интеллекта для обработки больших массивов данных и прогнозирования последствий вмешательства в водные системы. Ключевое значение в исследованиях имеет анализ и оценка региональных условий формирования поверхностного стока, а также объёмов и качества водных ресурсов в трёх ключевых зонах - регионах-донорах (источники перераспределяемого стока), транзитных зонах (территории транспортировки), регионах-реципиентах (зоны водопотребления).

Для сбора и анализа данных используются данные дистанционного зондирования Земли (в том числе из открытых источников, таких как спутники Sentinel, Landsat), официальная информация от Минприроды России, Минсельхоза России, Росгидромета и Гидрометцентра России, гидрологические, климатические и экологические базы данных, включая материалы государственного водного кадастра и мониторинга качества воды. Такой комплексный подход позволяет минимизировать экологические, социально-экономические и климатические риски, обеспечивая научную обоснованность и устойчивость предлагаемых решений.

Основными принципами обоснования экологически безопасного перераспределения стока между водосборными бассейнами являются:

— оптимизация управления водо- и землепользованием, направленная на восстановление и сохранение функциональной и структурной целостности водосборных (водообменных) бассейнов, ландшафтов, наземных и водных экосистем водосборных территорий;

— водохозяйственная деятельность должна отвечать экологическим требованиям и ограничениям;

— сохранение и улучшение состояния экосистем водных объектов и водосборных территорий при изъятии, транзите водных ресурсов между водосборными бассейнами и их использовании в бассейне-реципиенте;

— приоритетность использования дополнительно поступивших водных ресурсов для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения перед иными целями их использования;

— соблюдение баланса между объемом изъятия и возможностью воспроизводства поверхностных водных ресурсов;

— необходимость использования новых технологий интегрированного управления мелиоративно-водохозяйственным комплексом,

— обязательность применения экологически безопасных и экономически эффективных технологий, технических решений и конструкций, обеспечивающих водосбережение, защиту наземных и водных экосистем речных бассейнов от загрязнения и деградации, а населения и объектов экономики от вредного воздействия вод.

Основными подходами при разработке стратегии являются (*блок 2*):

— нравственный, предполагающий ответственность перед населением регионов за обеспечение питьевого и хозяйственного водоснабжения водными ресурсами в необходимых объёмах и требуемого качества;

— экосистемный, на основе которого водопользование всегда связано с системой экологических ограничений;

— геосистемный, дающий системное представление о функционировании речных бассейнов и бассейна Каспийского моря как результате взаимодействия климатических, геологических, гидрогеологических, нетектонических, антропогенных факторов;

— нексус-подход, который объединяет и координирует действия, проводимые в сфере обеспечения водными ресурсами, энергетикой и продовольствием;

— междисциплинарный, определяющий рассмотрение перераспределения части стока исходя из системного представления последствий с позиций естественных наук, экономики и социологии;

— аналитический, означающий необходимость аналитического подхода ко всем действиям на разных этапах проводимого обоснования.

В качестве основных компонентов системы перераспределения стока (*3 блок*) рассматриваются водообменные геосистемы речных бассейнов по трассе перераспределения стока бассейнов-доноров, бассейнов транзита и бассейнов-реципиентов, экосистемы водосборных территорий и водных объектов; водохозяйственно-мелиоративные системы, а также социально-экономические системы (*4 блок*).

Для всех компонентов необходимо выделение основных действующих факторов, определяющих функционирование геосистем речных бассейнов Каспийской системы в целом. Выделены природно-техногенные и социально-экономические факторы. К природно-техногенным относятся: климатические, гидрологические, геологические, неотектонические, гидрогеологические, геоморфологические, допустимые объемы изъятия водных ресурсов в бассейнах-донорах. К социально-экономическим – такие как особенности питьевого и сельскохозяйственного водопользования, фактическая и перспективная потребность в водных ресурсах, состояние гидротехнических сооружений мелиоративно-водохозяйственных систем и пр.

Основные научные принципы обоснования предусматривают (*5 блок*):

— акцент на нравственно-социальный аспект повышения водообеспеченности регионов;

— рассмотрение процесса перераспределения как геосистемного природоподобного;

— выделение водообменных систем как основных объектов исследований геосистем;

— обеспечение экосистемности водопользования;

— управление экологическими, социальными и экономическими рисками;

— применение методов цифровизации;

— внедрение актуальных водохозяйственных и гидротехнических инженерных решений;

— вариантную проработку решений с оценкой рисков и поиск компромиссов.

В качестве основных ограничений при обосновании частичного перераспределения стока (*6 блок*) является необходимость:

— сохранения устойчивости экосистем водосборных бассейнов;

— непревышения допустимых объемов изъятия водных ресурсов;

— нормирования объемов использования водных ресурсов;

— обеспечения благоприятного гидрологического режима рек-доноров;

— обеспечения благоприятных условий приема стока в регионах-реципиентах;

— нормативного технического состояния гидротехнических сооружений,

— соблюдения интересов разноцелевых водопользователей.

Основными методами научного обоснования (*7 блок*) являются классические естественнонаучные, полевые эксперименты, экспедиционные исследования, математическое и гидродинамическое моделирование и прогнозирование, методы ИИ, веб-ГИС-технологий, статистические, оптимизационные.

При технологическом обосновании (*8 блок*) используются инновационные технологии строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, современное гидротехническое оборудование, приборы и оборудование разноцелевого назначения, учитывается необходимость, объемы, оборудование для водоочистки и водоподготовки.

В соответствии с методом программно-целевого планирования для реализации основной цели перераспределения водных ресурсов Севера формулируются варианты ее достижения для сценарного рассмотрения решения проблемы (*9 блок*). Проводится выбор промежуточных целей, определение последовательности действий для их достижения, обосновываются сроки реализации и индикаторы достижения целей.

Для обоснования способов организации деятельности рассматриваются и определяются методы управления, рациональные технологические решения на всех этапах работ, а также формы оценки результативности (*10 блок*).

Обязательным элементом системы является предварительная оценка научного обоснования целесообразности частичного перераспределения водных ресурсов на основе сценарных исследований с учетом социальной, экологической и экономической значимости реализации проектов (*11 блок*).

В процессе предварительной оценки научного обоснования целесообразности частичного перераспределения водных ресурсов на основе сценарных исследований проводится обязательно рассмотрение (А) существующих политических решений в сфере обеспечения продовольственной безопасности, обеспечения социально-экономического развития, достижения ЦУР. Объектами ожидаемых положительных эффектов (Б) перераспределения стока являются питьевое и сельскохозяйственное водоснабжение, окружающая среда, здоровье и благосостояние населения регионов, продовольственная безопасность и социальная устойчивость нашей страны. В результате

предварительной оценки (*12 блок*) обосновывается выбор рационального решения проблемы частичного перераспределения водных ресурсов северных рек в бассейн р. Волга.

Стратегия повышения водообеспеченности вододефицитных регионов за счет перераспределения водных ресурсов, разрабатываемая на основе данной концептуальной модели, будет определять цель и задачи развития водохозяйственного комплекса АПК с учетом существующей антропогенной нагрузки на водные объекты, наличия и потребности в водных ресурсах для питьевого водоснабжения и орошения, социальной, экологической и экономической значимости решения вопросов, целевые региональные показатели, в том числе, по выделяемым этапам реализации стратегии, сформированы мероприятия для повышения водообеспеченности регионов реципиентов в сфере технического развития сельскохозяйственного водоснабжения.

Список литературы

1. Глобальная водная повестка: факты, риски, решения. НИЦ МКВК ЦА. – Ташкент, 2026. – 73 с.

2. Исаева С. Д. Водные ресурсы для орошения земель / С. Д. Исаева, Э. Б. Дедова // Мелиорация и водное хозяйство. – 2024. – № 4. – С. 74-78. – EDN ABFORQ.

3. Дедов А. А. Анализ и оценка состояния сельского хозяйства Республики Калмыкия в условиях усиления засушливости климата / А. А. Дедов, Э. Б. Дедова // Повышение продуктивности мелиорированных земель России на основе цифровизации и агротехнологий нового поколения. – Москва: Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, 2026. – С. 238-258. – EDN UPVMJQ.

4. Шевченко В. А. Новый этап развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса Российской Федерации / В. А. Шевченко, С. Д. Исаева, Э. Б. Дедова // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 4. – С. 355-361. – DOI 10.31857/S0869587323040114. – EDN SDJBQR.

5. Шевченко В. А. Состояние, проблемы и перспективы использования мелиорированных земель и водных ресурсов в агропромышленном комплексе в условиях климатических рисков / В. А. Шевченко, А. Л. Бубер // Плодородие. – 2026. – № 1(148). – С. 4-8. – DOI 10.25680/S19948603.2026.148.01. – EDN SOYYHT.

6. Данилов-Данильян В. И. Экология и климат: где мы сейчас и где будем через два-три десятилетия. ситуация в России / В. И. Данилов-Данильян, В. М. Катцов, Б. Н. Порфирьев // Вестник РАН. - 2023. - Т. 93, № 11. - С. 1032–1046.

7. Дедова Э.Б. Пространственная изменчивость агроклиматических ресурсов Калмыкии на основе данных многолетних наблюдений / Э.Б. Дедова, Г.Н. Кониева, Р.М.

Шабанов, А.А. Дедов // Повышение продуктивности мелиорированных земель России на основе цифровизации и агротехнологий нового поколения. – Москва: Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, 2026. – С. 47-55. – EDN SWNFRO.

8. Шевченко, В.А. Природно-ресурсный потенциал в новых климатических условиях / В.А. Шевченко, С.Д. Исаева, Э.Б. Дедова // Мелиорация сельскохозяйственных земель для устойчивого обеспечения продовольствием: К 95-летию со дня рождения академика РАН Ивана Пантелеевича Кружилина. – Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 2026. – С. 9-15. – EDN RBICPJ.

9. Каспийское море / под ред. А.Д. Добровольского, А.Н. Косарева. - М.: Изд.: МГУ, 1969. - 264 с.

10. Шило, Н. А. Природа колебаний уровня Каспия/ Н. А. Шило // Докл. АН. - 1989. - Т. 305, № 2. - С. 412–416.

11. Одеков О. А. Колебания уровня Каспийского моря: проблемы и решения / О. А. Одеков, Х. Дурдыев // Известия АН Азербайджана, Сер. Науки о Земле. - 2010. - № 4. - С. 100-109.

12. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / Под ред. д-ра геогр. наук Е.С. Нестерова. - М.: Триада лтд, 2016. - 378 с.

13. Дедова Э. Б. Водообеспечение Каспийского моря / Э. Б. Дедова, А. А. Дедов // Мелиорация сельскохозяйственных земель для устойчивого обеспечения продовольствием: К 95-летию со дня рождения академика РАН Ивана Пантелеевича Кружилина. – Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 2026. – С. 247-260. – EDN KERQSD

14. Угроза для пяти стран. Каспийское море переживает катастрофу // Аргументы и Факты. - Информационный ресурс: https://aif.ru/society/ecology/ugroza-dlya-pyati-stran-kaspiyskoe-more-perezhivaet-katastrofu?ysclid=msd7pfwg7960974152 Обращение: 23.06.2026

15. Исаева С. Д. Принципы и алгоритм создания ГИС-веб-системы поддержки принятия решений по интегральному управлению мелиоративно-водохозяйственным комплексом / С. Д. Исаева, Э. Б. Дедова, А. В. Матвеев, Р. М. Шабанов // Мелиорация земель в решении геоэкологических проблем Евразии (Костяковские чтения): Материалы международной Научно-практической конференции, Москва, 14–15 декабря

2023 года. – Москва: ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», 2024. – С. 407-413. – DOI 10.37738/VNIIGIM.2024.71.47.064. – EDN OBREGG.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026613885 Российская Федерация. Интеллектуальная мультиагентная геоинформационно-аналитическая система мониторинга и управления мелиоративно-водохозяйственным комплексом для повышения плодородия почв: заявл. 03.02.2026: опубл. 10.02.2026 / В. А. Шевченко, А. В. Матвеев, С. Д. Исаева [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова». – EDN OASOVT.

17. Исаева С. Д. Концептуальные подходы к перераспределению речного стока в условиях потепления / С. Д. Исаева // Стратегия мелиорации в эпоху климатических вызовов: водосбережение и продовольственная безопасность: К 60-летию Масштабной программы развития мелиорации. – Москва: Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, 2026. – С. 221-229.

ВОДНОЕ ПАРТНЕРСТВО ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПРОЕКТА «ВОДА РОССИИ» НАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТА «ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ БЛАГОПОЛУЧИЕ»

Субботина Е.Г., *Ковтун Н.Н.*
ФГБУ РосНИИВХ
E-mail: katia_sybbota@mail.ru

Аннотация: В работе рассматривается федеральный проект «Вода России» как элемент национального проекта «Экологическое благополучие», основанный на комплексном подходе к управлению водными ресурсами, сочетающий нормативно-правовые, организационные, технологические и общественные механизмы. Раскрывается значимость водного партнёрства, как основополагающего принципа проекта, который предполагает консолидацию усилий федеральных и региональных органов власти, бизнеса, научного и общественного сообществ для решения задач по охране, восстановлению и рациональному использованию водных ресурсов. Охарактеризована организационная структура реализации проекта и уделено внимание многоуровневой координации. Представлена система отбора и ранжирования мероприятий в рамках проекта, описаны критерии приоритизации, а также принципы распределения работ по бассейновым округам с учётом бюджетных ограничений. Отмечена роль цифровых инструментов управления (ГИС ЦП «Вода» сегмент «Планирование и контроль исполнения») для учёта, обработки и контроля реализации мероприятий. Представлены целевые показатели проекта, увязанные с задачами по обеспечению экологической устойчивости и социально-экономического развития территорий.

Ключевые слова: водное партнерство, федеральный проект, критерии оценки, целевые показатели

WATER PARTNERSHIP IN THE FORMATION AND IMPLEMENTATION OF THE FEDERAL PROJECT “WATER OF RUSSIA” WITHIN THE NATIONAL PROJECT “ENVIRONMENTAL WELL-BEING”

Subbotina E.G., *Kovtun N.N.*
FSBI RosNIIVKh
E-mail: katia_sybbota@mail.ru

Abstract: The paper examines the federal project “Water of Russia” as an element of the national project “Environmental Well-being,” which is based on an integrated approach to water resource management, combining regulatory, organizational, technological, and public mechanisms. The significance of water partnership is revealed as a fundamental principle of the project, which involves consolidating the efforts of federal and regional authorities, businesses, and the scientific and public communities to address the tasks of protecting, restoring, and rationally using water resources. The organizational structure for implementing the project is described, and attention is paid to multi-level coordination. A system for selecting and ranking activities within the project is presented; the prioritization criteria are described, as well as the principles for distributing work across basin districts, taking into account budget constraints. The role of digital management tools (GIS Central Project “Water”, segment “Planning and Monitoring of Implementation”) for recording, processing, and monitoring the implementation of activities is noted. The project’s target indicators are presented; they are linked to the tasks of ensuring environmental sustainability and socio-economic development of the territories.
Keywords: water partnership, federal project, evaluation criteria, target indicators

Вопросы водных ресурсов и водопользования, а также выработка решений, направленных на обеспечение общей и секторальной устойчивости, постоянно присутствуют в повестке профессионального водохозяйственного сообщества. Наличие ресурса, его состояние, а также развитость связанной с ним инфраструктуры определяют устойчивость функционирования отраслей и возможности социально-экономического развития государства. Самый уязвимый и одновременно важнейший природный компонент воспринимает нарастающую антропогенную нагрузку, а также подвергается трансформациям, обусловленным климатическими изменениями. Россия от природы богата пресными водами, относительная сложность лишь в том, что распределены они по территории неравномерно, а часть из них формируется в бассейнах трансграничных водотоков и в силу этого востребована также сопредельными странами. В последние годы, отвечая социальному запросу россиян, основные усилия сосредоточены на вопросах охраны и восстановления водных объектов, экологии водных и околоводных экосистем. Совершенствуется система управления использованием и охраной водных объектов, основанная на бассейновом принципе и документах стратегического планирования водохозяйственной деятельности в речных бассейнах.

В Указе Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 года № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» «экологическое благополучие» названо одной из национальных целей развития Российской Федерации.

Экологическое благополучие населения напрямую зависит от экологического состояния водных объектов, но без консолидации усилий организаций, занимающихся управлением водными ресурсами, включая правительственные структуры, профессиональные сообщества, научно-исследовательские институты, неправительственные организации и частный сектор, достичь баланса в рациональном использовании водных ресурсов невозможно.

Значение водного партнёрства многогранно и затрагивает как локальные, так и глобальные вызовы. Оно помогает решать проблемы нехватки воды, её рационального использования, охраны экосистем и выстраивания диалога как внутри общества и между секторами экономики, так и между странами.

Принцип водного партнерства – сотрудничество всех заинтересованных сторон для решения задач, связанных с управлением, использованием и охраной водных ресурсов, лёг в основу разработки и реализации федерального проекта «Вода России» национального проекта «Экологическое благополучие» (далее проект), объединив задачи двух ранее действовавших программ — «Оздоровление Волги» и «Сохранение уникальных водных объектов», расширив при этом географию работ.

Федеральный проект «Вода России» стартовал 1 января 2025 года. Куратором проекта выступает Министерство природных ресурсов и экологии РФ, администратором проекта - «ВНИИ Экология», а за его реализацию отвечает Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурсы).

ФП «Вода России» связан с государственными программами РФ (комплексными программами), такими как ГП РФ «Воспроизводство и использование природных ресурсов», ГП РФ «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан РФ», ГП РФ «Охрана окружающей среды».

Целевыми показателями ФП «Вода России» являются протяженность расчищенных участков водных объектов и численность населения, для которого будут созданы комфортные условия проживания вблизи водных объектов за счет улучшения экологического состояния озер и водохранилищ, улучшения экологического состояния гидрографической сети (водотоков, водоёмов), строительства, реконструкции гидротехнических сооружений в целях создания гарантированных источников водоснабжения населения и обеспечения обводнения территорий.

Источником данных для оценки достижения целевых показателей служит Государственная информационная система «Цифровая аналитическая платформа предоставления статистических данных» (ГИС ЦАП).

В рамках федерального проекта «Вода России» выстраивается масштабное водное партнёрство — создана и работает система взаимодействия разных уровней власти, структур экономики, бизнеса и экспертного сообщества.

При формировании федерального проекта, направленного на оздоровление водных объектов, водное партнёрство стало ключевым механизмом — то есть системой взаимодействия разных участников для решения общей задачи.

На уровне федеральных органов власти Минприроды России координирует работу таких ведомств как Росводресурсы (отвечают за водохозяйственный комплекс), Росприроднадзор (контроль и надзор за соблюдением экологического законодательства), Росгидромет (мониторинг состояния водных объектов), Минстрой (строительство и модернизация очистных сооружений, ливневых канализаций).

На региональном уровне именно субъекты РФ формируют на местах перечни конкретных объектов для приоритетного оздоровления, разрабатывают региональные программы, привлекают софинансирование.

Предприятия-водопользователи и промышленные предприятия вовлечены в реализацию конкретных задач, участвуют в проекте через программы модернизации очистных сооружений, внедрения наилучших доступных технологий (НДТ), снижения сбросов загрязняющих веществ, строительства гидротехнических сооружений.

Отраслевые объединения (например, Российская ассоциация водоснабжения и водоотведения) выступили экспертами в разработке критериев отбора проектов, предлагали стандарты, участвовали в обучении проектировщиков для повышения качества проектно-сметной документации. Кроме того, вместе с Минстроем России участвовали в разработке критериев отбора объектов, условиях их финансирования и общих подходах к обновлению очистных сооружений для повышения их эффективности.

Общественные организации, эксперты, научное сообщество предоставляют аналитику, участвуют в обсуждении критериев отбора проектов, разработке стандартов, повышают экспертный потенциал в области экономического анализа и применения экономических инструментов для устойчивого управления водными ресурсами и развития водохозяйственных систем.

Вовлечённость местного сообщества не менее важна для успешной реализации проекта (например, в рамках благоустройства прибрежных территорий - синергия с проектом «Формирование комфортной городской среды»).

Такой подход позволяет решать комплексные задачи: не просто чистить русло, а комплексно подходить к проблеме — снижать нагрузку от разных источников, синхронизировать разные виды мероприятий, учитывать региональные особенности и вовлекать общество.

На стадии формирования проекта, с целью обеспечения скоординированного развития и управления водными ресурсами, сразу был применен Принцип водного партнерства с участием федеральных и региональных органов власти, научного сообщества, общественных объединений и бизнеса.

В работе по обеспечению экспертно-аналитической поддержки процесса формирования перечня мероприятий, необходимых для реализации ФП «Вода России» и их реализации задействованы 12 министерств и ведомств.

Межведомственная рабочая группа при Минприроды РФ — главный координационный механизм. В ней представители разных сфер совместно прорабатывают критерии: какие объекты оздоравливать в первую очередь (с учётом нагрузки, плотности населения, экологического состояния), как синхронизировать разные мероприятия (расчистка русел рек, строительство очистных сооружений, благоустройство территорий) и прочее.

Минстрой России, Минсельхоз России, Минэкономразвития России, Минтранс России, Минпромторг России, Росрыболовство, Росгидромет, Росводресурсы, Росморречфлот, Ростехнадзор и Росприроднадзор обеспечивают совместную работу с субъектами Российской Федерации по инвентаризации объектов, оказывающих негативное воздействие на состояние водных объектов.

По итогам инвентаризации водных объектов (участков водных объектов) выполняется оценка мероприятий для определения целесообразности их реализации и оценка соответствия их базовым критериям.

Территориальные органы Росводресурсов обеспечивают свод и обобщение представленных перечней мероприятий органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации по зоне деятельности, рассмотрение их на бассейновых советах для определения целесообразности их реализации.

В рамках ФП «Вода России» выделяют направление «Улучшено экологическое состояние гидрографической сети». ФГБУ РосНИИВХ осуществляет критериальную оценку представленных территориальными органами Росводресурсов перечней мероприятий и документов, подтверждающих их соответствие заявленным критериям по данному направлению и осуществляет оценку мероприятий, обеспечивающих достижение показателей ФП «Вода России», включая ранжирование мероприятий в соответствии с такими критериями как: нахождение водного объекта в границах опорного населенного пункта, особо охраняемой природной территории, являющегося объектом международного соглашения, использование водного объекта как источника питьевого водоснабжения, объекта мелиоративного комплекса или использование в рекреационных целях либо расположенного в границах национального туристического маршрута, водные объекты, рекомендованные к расчистке поручениями Президента РФ, постановлениями Совета Федерации РФ и нормативными правовыми актами Правительства РФ, а также включенные в долгосрочные планы комплексного

социально-экономического развития городов Дальнего Востока или находящиеся на территории Арктической зоны РФ.

Ранжирование мероприятий основывается на принципах охвата максимально возможного числа регионов в 21 бассейновом округе, по убыванию присвоенных баллов с учетом объемов бюджетных ассигнований.

Все операции по обработке материалов, представленных субъектами, ведутся на платформе ГИС ЦП Вода Сегмент "Планирование и контроль исполнения".

После прохождения этапов согласования заявок субъектов, руководителями и специалистами УОИВ субъектов РФ, БВУ, ЦРВХ и ФГБУ РосНИИВХ, ранжированный перечень мероприятий направляется на рассмотрение на заседании рабочей группы. Согласованный и утвержденный перечень мероприятий включается в программу финансирования проекта.

Федеральный проект «Вода России» представляет собой системную и масштабную инициативу, призванную обеспечить устойчивое управление водными ресурсами и улучшить экологическое состояние водных объектов в стране, это целостная модель устойчивого водопользования, сочетающая нормативно-правовое регулирование, межведомственную координацию, экспертную аналитику, цифровые инструменты и вовлечение общества. Её реализация, основанная на принципах водного партнерства, способна обеспечить долгосрочный экологический и социально-экономический эффект, повысив качество жизни граждан и устойчивость ключевых отраслей экономики.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации № 309 от 07 мая 2024 года «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015

2. Национальный проект «Экологическое благополучие» https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/ekologicheskoe-blagopoluchie/

3. Паспорт Федерального проекта «Вода России» https://rawww.ru/assets/files/%D0%9F%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%20%D0%A4%D0%9F%20%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8.pdf

СОЗДАНИЕ СЕГМЕНТА «УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩАМИ» В СОСТАВЕ ГИС ЦП «ВОДА»

Косолапов А.Е.[1], Савостицкий Д.В.[2], ***Головачева М.М.*** [1]
[1] Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ФГБУ РосНИИВХ), г. Ростов-на-Дону
[2] Федеральное агентство водных ресурсов, г. Москва
E-mail: mariya_200218@mail.ru

Аннотация: В данной работе определена цель создания сегмента «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода». Описан состав функциональных компонент данного сегмента: информационно-аналитического модуля, модуля «Мониторинг», модуля «Управление» и интеграционного модуля. Охарактеризованы процессы администрирования и основной технологический процесс мониторинга и управления режимами работы водохранилищ. Продемонстрированы примеры задач решения высокой степени риска и расчетов режимов работы водохранилищ с использованием различных прогнозных данных.

Ключевые слова: сегмент «Управление водохранилищами», ГИС ЦП «Вода», режим работы водохранилища, прогноз, половодье и предполоводная сработка.

MANAGING THE IRIKLINSKY RESERVOIR'S OPERATING MODE IN INCOMPLETE INFORMATION'S CONDITIONS AND UNCERTAINTY

Kosolapov A.E. [1], Savostitskiy D.V. [2], ***Golovacheva M.M.*** [1]
[1] Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-on-Don
[2] Federal Agency for Water Resources, Moscow
E-mail: mariya_200218@mail.ru

Abstract: This article defines the purpose of creating the “Reservoir Management” segment of the GIS «Digital Platform «Water»». The composition of this segment’s functional components is described: the information and analytical module, the “Monitoring” module, the “Management” module, and the integration module. The administration processes and the main technological process of monitoring and managing reservoir operating modes are characterized. Examples of tasks involving high-risk solutions and calculations of reservoir operating modes using various forecast data are demonstrated.

Keywords: the “Reservoir Management” segment, GIS «Digital Platform «Water»», reservoir operating mode, forecast, spring flood and pre-flood drawdown.

В условиях возрастающей антропогенной нагрузки на водные объекты и климатической нестабильности проблемы рационального использования и охраны водных ресурсов приобретают особую значимость в рамках задач государственной политики Российской Федерации в области экологического развития страны и ее экологической безопасности [1]. Целью создания сегмента «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода» является формирование единого информационно-технологического пространства мониторинга состояния и управления режимами работы водохранилищ, обеспечивающего подготовку и обоснование решений об установлении режимов их работы, доведение установленных режимов до эксплуатирующих организаций и контроль их соблюдения.

Единое информационно-технологическое пространство представляет собой согласованную совокупность информационных ресурсов, нормативно-справочной информации, расчетных моделей, функциональных компонентов и средств информационного взаимодействия, используемых участниками технологического процесса мониторинга и управления режимами работы водохранилищ.

Сегмент «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода» обеспечивает подготовку советующих решений и фиксацию результатов их рассмотрения. Принятие решения об установлении режима работы водохранилища сохраняется за уполномоченными органами и должностными лицами.

В состав сегмента «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода» входят следующие функциональные компоненты:

– модуль «Формирование карты «Обстановка» и решения по снижению степени риска» – создание слоя водохозяйственной обстановки с цветовыми индикаторами степени риска состояния водохранилищ, формирование карточек водохранилищ с общей информацией и причинами степени риска, решение задачи снижения высокого риска;

– модуль «Мониторинг» – контроль полноты и качества данных, расчет производных показателей, формирование условий определения степени риска, автоматизированное сопоставление фактического режима работы водохранилища с установленным режимом, выявление и фиксация отклонений, формирование и направление уведомлений ответственным лицам;

– модуль «Управление» – постановка расчетной задачи, вариантные расчеты режимов на различные периоды, проверка ограничений, представление и сопоставление расчетных вариантов, а также подготовка сведений об установленном режиме;

– интеграционный модуль – автоматизированное информационное взаимодействие функциональных компонентов сегмента «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода», включая передачу в модуль «Управление» оперативных и прогнозных данных и результатов мониторинга, а в модуль «Мониторинг» – сведений об установленном режиме, а также обмен с другими сегментами ГИС ЦП «Вода» и иными внешними системам.

Функционирование модулей обеспечивается информационными ресурсами сегмента «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода», в составе которых ведутся нормативно-справочная информация, сведения о водохранилищах и ГТС, оперативная и прогнозная информация, расчетные модели, вариантные расчеты, установленный режим, а также сведения о соблюдении установленного режима. Схема внутренней структуры сегмента «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода» представлена на рис. 1.

В составе сегмента «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода» выделяются процессы администрирования и основной технологический процесс мониторинга и управления режимами работы водохранилищ.

Администрирование включает:

– ведение и актуализацию нормативно-справочной информации и условно-постоянных сведений о водохранилищах и ГТС в случае изменения ПИВР;

– настройку информационного взаимодействия и разграничение прав доступа.

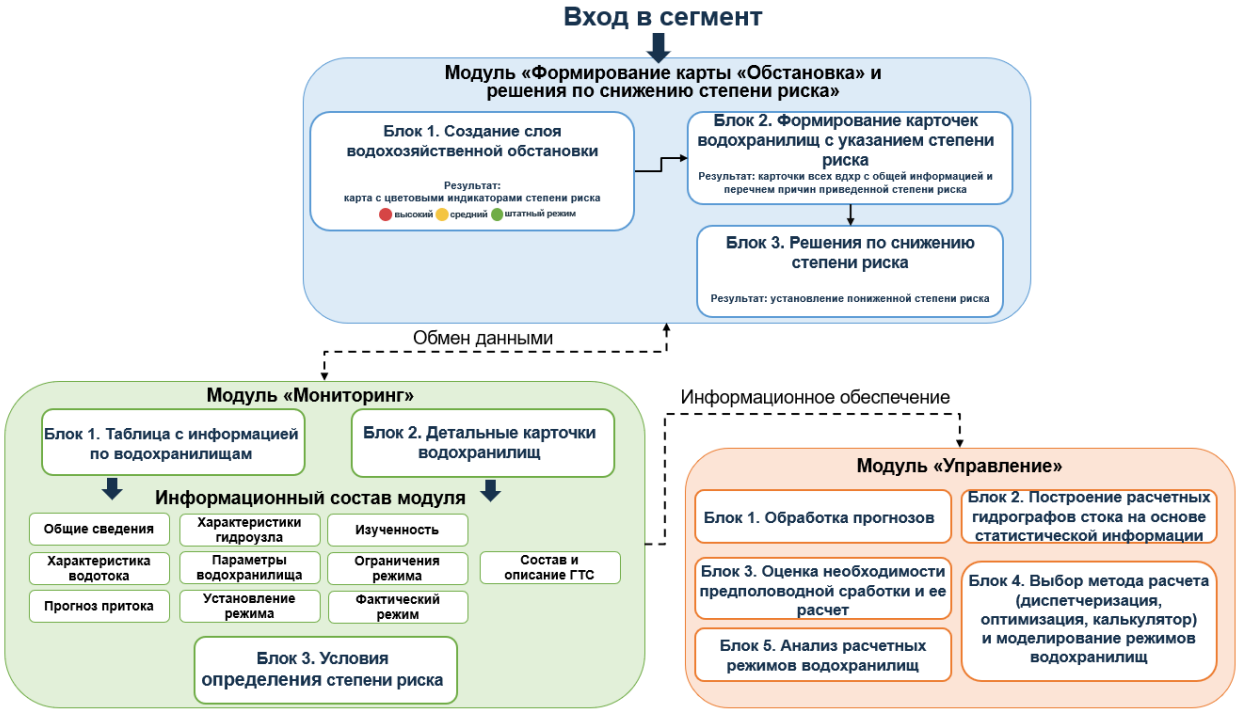


Рис. 1 – Схема внутренней структуры сегмента «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода»[1]

Технологическая схема процесса мониторинга и управления режимами работы водохранилищ отражает единый технологический цикл, объединяющий получение и проверку оперативных данных, автоматизированный анализ состояния водохранилищ, выявление рисков, расчет вариантов режима и последующий контроль соблюдения установленных режимов.

Исходной информационной основой процесса являются ежесуточные показатели фактического режима работы водохранилищ, данные гидрологических постов и иных информационных систем, прогнозы приточности, предложения основных водопользователей, а также нормативно-справочная информация: параметры водохранилищ и гидротехнических сооружений, статические кривые, требования ПИВР, ограничения по уровням, расходам и интенсивности наполнения и сработки.

На первом этапе оперативные дежурные БВУ обеспечивают ввод данных о фактических режимах работы водохранилищ. Данные могут вноситься вручную либо загружаться из файлов установленного формата. В сегменте «Оперативный дежурный» выполняются: первичный ввод, форматно-логическая проверка, формирование ежедневной отчетности, согласование отчета руководителем БВУ и передача данных для дальнейшего анализа.

В модуль «Мониторинг» УВ 2.0 данные поступают также из других сегментов ГИС ЦП Вода, в частности, из сегмента «Государственный водный реестр» и из сегмента обработки сведений об использовании воды в Российской Федерации 2-тп (водхоз),

[1] Составлена авторами по материалам исследования

кроме того, из иных систем, включая системы Росгидромет, Ростехнадзора, Минсельхоз и МЧС. Сегмент «Государственный водный реестр» обеспечивает сведениями о сооружениях, договорах водопользования и решениях о предоставлении прав пользования водным объектом, включая сроки водопользования, объемы забора/сброса, площадь использованной акватории, имя водопользователя, места водопользования для документов, зарегистрированных после 2018 года, а сегмент обработки сведений об использовании воды в Российской Федерации 2-тп (водхоз) — о перечне водопользователей и об основных показателях использования воды (объемы заборов и сбросов).

Проверенные данные поступают в модуль «Мониторинг» УВ 2.0. Этот модуль является функциональным развитием ранее созданного в составе сегмента «Оперативный дежурный» модуля «Мониторинг водохранилищ». В целевой архитектуре модуль «Мониторинг» УВ 2.0 рассматривается как информационная основа определения степени риска состояния водохранилищ и подготовки решений по режимам работы водохранилищ.

Решение задачи оперативного управления по снижению степени риска состояния водохранилища (на сутки, несколько суток) предполагает выполнение анализа степени рисков, причин их возникновения, а также подготовку советующих решений по их снижению. При расчете режима работы водохранилища на текущие сутки (с 8:00 текущих суток до 8:00 следующих суток) должны проверяться следующие технологические условия: непревышение максимальной пропускной способности гидроузла, соблюдение допустимой интенсивности сработки (наполнения) водохранилища, а также максимального уровня и расхода воды в нижнем бьефе по условиям незатопления. При понижении степени риска расчетное положение уровня воды водохранилища на 8 утра следующих суток не должно быть ниже отметки МНУ, УМО, выше уровня обязательной предполоводной сработки (УПС) на дату УПС, отметки ФПУ-50%*(ФПУ-НПУ). В том случае, если установленные отдачи воды из водохранилища позволяют снизить степень риска до среднего уровня или штатного режима работы, на карте текущей обстановки состояния водохранилищ модуля «Мониторинг» цветовой индикатор (красный цвет) водохранилища автоматически заменяется цветовым индикатором жёлтого или зелёного цвета. В том случае, если установленный режим не позволяет изменить высокий риск на средний риск или штатный режим за сутки, должно рассматриваться снижение степени риска за несколько суток (рис 2-5).

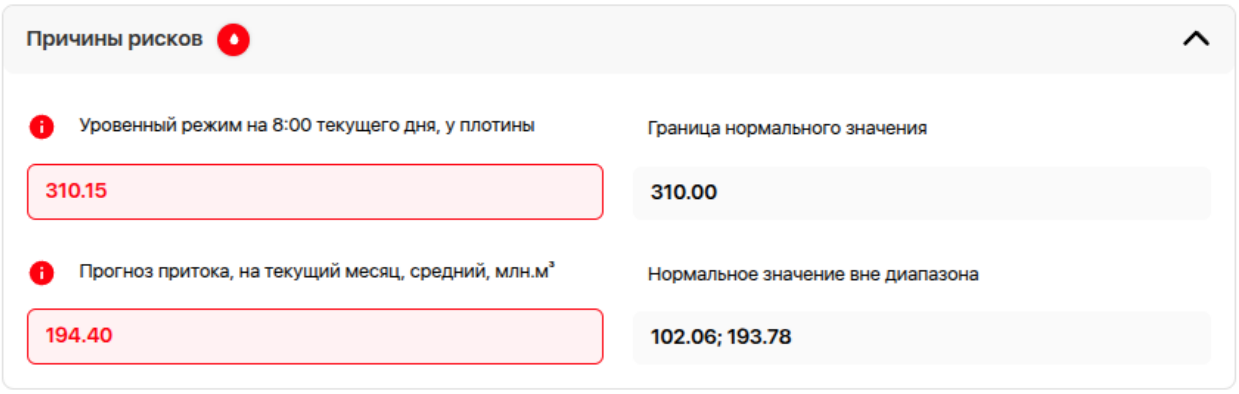


Рис. 2 – Пример отображения причин возникновения высокой степени риска для Зейского водохранилища[2]

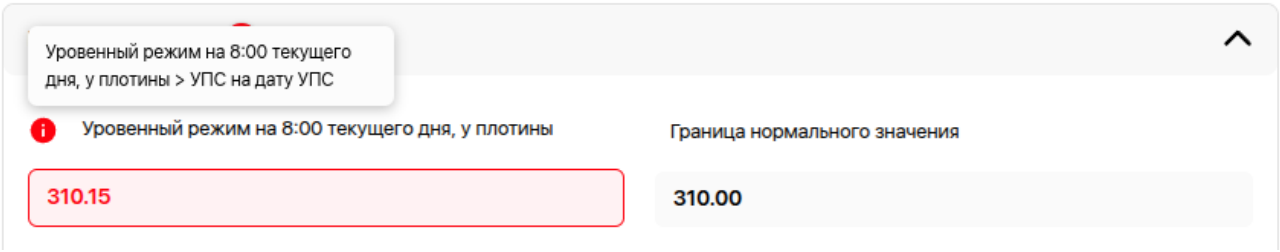


Рис. 3 – Пример отображения высокой степени риска по причине превышения УПС на дату УПС для Зейского водохранилища[3]

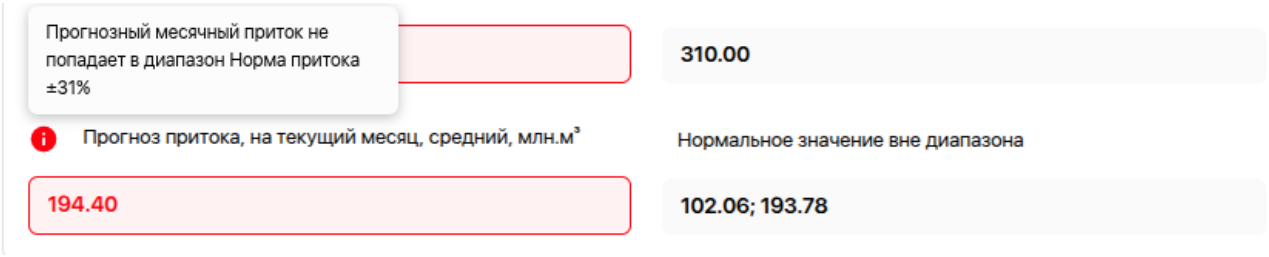


Рис. 4 – Пример отображения высокой степени риска по причине несоответствия прогнозного значения притоку допустимому диапазону нормальных значений для Зейского водохранилища[4]

Выявление высокого риска, отклонение фактического режима от установленного, поступление нового прогноза приточности, подготовка к половодному или меженному периоду, а также инициатива ответственного специалиста являются основаниями для расчета нового или уточненного режима. При отсутствии таких оснований продолжаются текущий мониторинг, формирование отчетности, уведомление пользователей и контроль соблюдения ранее установленного режима.

2 Составлено авторами по материалам исследования
3 Составлено авторами по материалам исследования
4 Составлено авторами по материалам исследования

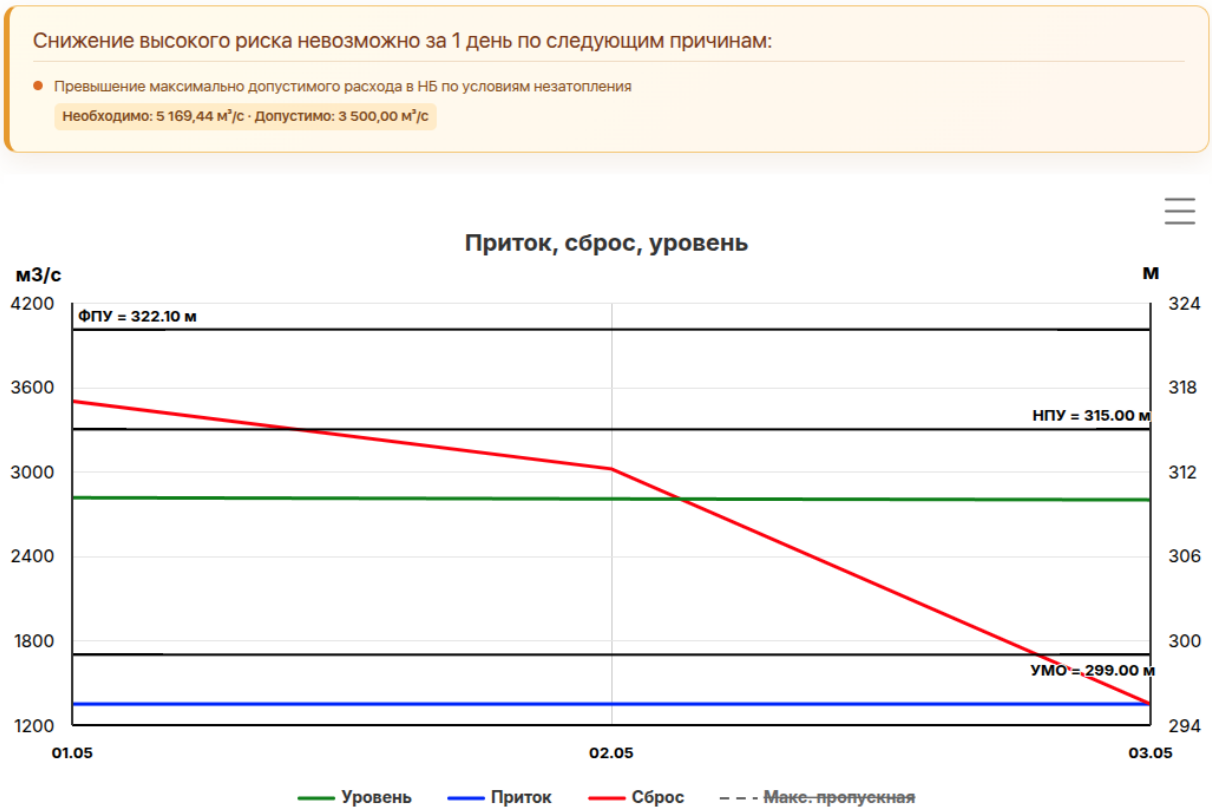


Рис. 5 – Пример снижения высокой степени риска для Зейского водохранилища[5]

При наличии оснований в модуле «Управление» определяется постановка расчетной задачи: снижение степени риска, расчет режима на несколько суток, определение необходимости и объема предполоводной сработки, управление в период половодья или межени либо расчет режима на водохозяйственный год.

Расчет режима выполняется с использованием предусмотренных инструментов: «калькулятора», диспетчеризации по установленным правилам или оптимизация. В зависимости от характера задачи в модуле «Управление» выполняются вариантные расчеты режима работы водохранилища, предусматривающие сопоставление нескольких расчетных вариантов с учетом различных сочетаний исходных условий: фактического состояния водохранилища, прогноза приточности, предложений основных водопользователей, установленного или ранее рекомендованного режима, технологических и водохозяйственных ограничений. При расчете также учитываются параметры гидротехнических сооружений, допустимая интенсивность наполнения и сработки, ограничения по уровням верхнего бьефа, условия незатопления в нижнем бьефе, а также иные требования, установленные правилами использования водных ресурсов конкретных водохранилищ и решениями уполномоченных органов.

[5] Составлено авторами по материалам исследования

По результатам расчета формируются сравнительные таблицы вариантов, графики изменения уровней, объемов, приточности и сбросов, картографические материалы, отчеты и иные аналитические представления. Материалы используются для подготовки советующих решений и последующего рассмотрения ответственными должностными лицами, межведомственными рабочими группами или иными уполномоченными участниками процесса. По итогам такого рассмотрения формируется согласованный режим работы водохранилища, который после принятия соответствующего решения доводится до эксплуатирующей организации как установленный режим.

При решении задач управления режимом работы водохранилищ (на предполоводный, половодный периоды и период межени, а также в целом на водохозяйственный год) могут использоваться следующие виды прогнозов приточности воды к водохранилищам, поступающими от Гидрометслужбы [2]:

— квартальный прогноз с возможными уточнениями по месяцам и суткам;

— предварительный прогноз на период половодья, включающий информацию об объемах предстоящего половодья (мин-макс) и дату поступления прогноза;

— основной прогноз, включающий информацию о сроках прохождения половодья, объемах предстоящего половодья (мин-макс), максимального расхода и дате его прохождения.

При установлении режимов работы водохранилищ на основе квартального прогноза отдачи из водохранилища принимаются либо равномерными по суткам или отдельным периодам на весь квартал, либо по действующим диспетчерским правилам в соответствующих диспетчерских зонах (рис 6).

Предварительный прогноз половодья содержит информацию об объемах предстоящего половодья (мин-макс), а также дату поступления самого прогноза. По указанным данным должны автоматически определяться: обеспеченность предстоящего половодья и доступные методы управления режимом работы водохранилища («калькулятор», диспетчеризация, «оптимизация») на предполоводный период и период прохождения половодья.

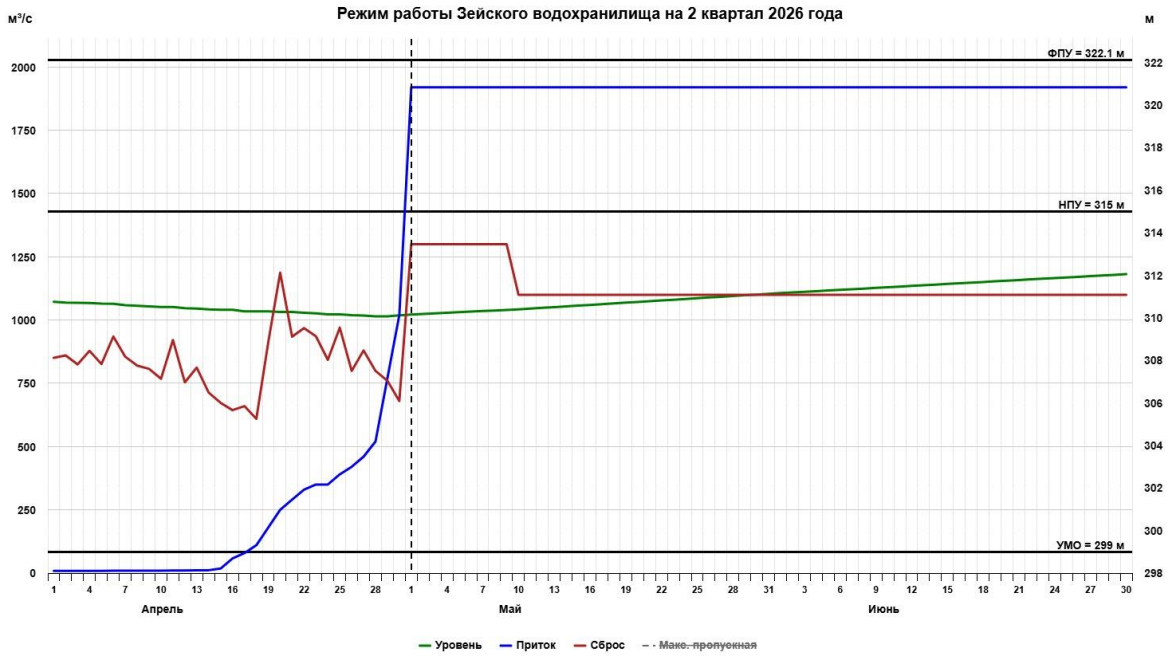


Рис. 6 – Пример режима работы Зейского водохранилища, установленного на основе квартального прогноза[6]

На основе установленной в автоматическом режиме обеспеченности предстоящего половодья должны осуществляться построение модели гидрографа (экстремальное половодье и прочие половодья), расчет режима работы водохранилища на период предполоводной сработки и период половодья, а также определяться необходимость и объем предполоводной сработки водохранилища (максимально допустимая отметка предполоводной сработки и средний максимальный сбросной расход из водохранилища при пропуске половодья). Недостающая информация о сроках половодья, максимальных расходах в период прохождения половодья и дате прохождения максимальных расходов должна определяться на основе имеющейся гидрологической информации в базе данных или задаваться вручную.

Расчетный режим работы водохранилища должен обеспечивать:

— непревышение наполнения водохранилища выше установленных условий ($p \leq 1\%$);

— максимально возможный уровень наполнения водохранилища при низких половодьях.

Основной прогноз содержит информацию о сроках прохождения половодья, объемах предстоящего половодья (мин-макс), максимальном расходе и дате его прохождения. По указанным данным должны автоматически определяться: обеспеченность предстоящего половодья и доступные методы управления режимом

6 Составлено авторами по материалам исследования

работы водохранилища («калькулятор», диспетчеризация, «оптимизация») на предполоводный период и период прохождения половодья. На основе установленной в автоматическом режиме обеспеченности предстоящего половодья должны осуществляться построение модели гидрографа (экстремальное половодье и прочие половодья), расчет режима работы водохранилища на период предполоводной сработки и период половодья, а также определяться необходимость и объем предполоводной сработки водохранилища (максимально допустимая отметка предполоводной сработки и средний максимальный сбросной расход из водохранилища при пропуске половодья).

Расчетный режим работы водохранилища должен обеспечивать:

— непревышение наполнения водохранилища выше установленных условий ($p \leq 1\%$);

— максимально возможный уровень наполнения водохранилища при низких половодьях.

При решении задачи расчета режима предполоводной сработки и пропуска половодья обязательно предусматривается возможность расчета режима работы водохранилища на период после прохождения половодья.

Расчетные, а также рекомендованные по результатам рассмотрения на МРГ режимы работы водохранилищ автоматически вносятся в базу модуля «Мониторинг» сегмента «Управление водохранилищами» и используются для сравнительного контроля фактического и расчетного режимов работы водохранилищ.

Таким образом, сегмент «Управление водохранилищами» ГИС ЦП «Вода» обеспечивает единый непрерывный технологический процесс от получения и проверки оперативных данных о состоянии водохранилищ до принятия согласованного управленческого решения.

Список литературы

1. Проект Водная стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. – URL: https://raww.ru/assets/modckeditor/default/0/novaya-vodnaya-strategiya-do-2035.pdf?ysclid=mtag0cpb3923970553

2. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – URL: https://www.meteorf.gov.ru/

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ МЕЖГОСУДАРСТВЕННОГО ВОДОДЕЛЕНИЯ РЕКИ ИРТЫШ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕРХНЕ-ИРТЫШСКОГО КАСКАДА ВОДОХРАНИЛИЩ С УЧЕТОМ ЭКОСИСТЕМНЫХ ТРЕБОВАНИЙ

Никитина О.И., *Косолапов А.Е. Болгов М.В.*
ФГБУ РосНИИВХ, г. Ростов-на-Дону
E-mail: oxana.niki@yandex.ru

Аннотация: В работе рассматриваются подходы к разработке принципов межгосударственного вододеления стока р. Иртыш между Республикой Казахстан и Российской Федерацией с учетом экосистемных требований в условиях регулирования стока Верхне-Иртышским каскадом водохранилищ. На основе многолетних гидрологических рядов выполнена оценка изменений годового и сезонного стока и внутригодового распределения стока до и после заполнения водохранилищ, а для приграничного створа р. Иртыш – с. Татарка определены параметры экологического стока методом критических гидрологических условий. На основе оценки экосистемных требований предложены количественные параметры режима экологического стока. Полученные результаты могут быть использованы для научного обоснования экологически допустимых объемов изъятия стока и разработки рекомендаций по межгосударственному распределению водных ресурсов р. Иртыш.

Ключевые слова: Иртыш; трансграничные водные ресурсы; межгосударственное вододеление; экологический сток; Верхне-Иртышский каскад водохранилищ.

DEVELOPING PRINCIPLES FOR INTERGOVERNMENTAL WATER ALLOCATION IN THE IRTYSH RIVER BASIN UNDER THE OPERATION OF THE UPPER IRTYSH RESERVOIR CASCADE, WITH CONSIDERATION OF ECOSYSTEM REQUIREMENTS

Nikitina O.I., *Kosolapov A.E., Bolgov M.V.*
FSBI RosNIIVKh, Rostov-on-Don
E-mail: oxana.niki@yandex.ru

Abstract: This paper examines approaches to developing principles for intergovernmental water allocation in the Irtysh River between the Republic of Kazakhstan and the Russian Federation, taking ecosystem requirements into account under flow regulation by the Upper Irtysh Reservoir Cascade. Based on long-term hydrological records, changes in annual and seasonal runoff and intra-annual flow distribution before and after reservoir filling were assessed, and environmental flow parameters were determined for the Irtysh River–Tatarka section using the critical hydrological conditions method. Based on the assessment of ecosystem requirements, quantitative parameters of the environmental flow regime were proposed. The results can be used to provide a scientific basis for determining environmentally acceptable levels of water abstraction and for developing recommendations on intergovernmental allocation of the Irtysh River's water resources.

Keywords: Irtysh River; transboundary water resources; intergovernmental water allocation; environmental flow; Upper Irtysh Reservoir Cascade.

Введение

Проблема согласованного вододеления стока трансграничной р. Иртыш приобретает особую актуальность. Российско-казахстанский трансграничный участок реки характеризуется малой боковой приточностью и высокой зависимостью от стока, поступающего с территории Казахстана. Он имеет важное водохозяйственное значение для России и включает ценные пойменные экосистемы, большая часть которых расположена в Павлодарской области Казахстана.

Современное состояние р. Иртыш определяется значительной антропогенной трансформацией гидрологического режима. На территории Казахстана с 1960-х годов на реке функционирует Верхне-Иртышский каскад водохранилищ (Бухтарминское, Усть-Каменогорское и Шульбинское). Дополнительное влияние оказывают водозаборы в Китае и Казахстане, а также межбассейновая переброска части стока по каналу Иртыш–Караганда. В результате существенно изменился гидрологический режим реки, прежде всего сезонная структура стока, что требует учета экосистемных последствий при разработке принципов распределения стока.

Несмотря на действие Соглашения между Правительством Республики Казахстан и Правительством Российской Федерации о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов от 7 сентября 2010 г., количественные механизмы распределения стока между государствами в настоящее время отсутствуют. Не определены также экологически допустимые пределы использования трансграничных водных ресурсов. В условиях прогнозируемого роста водопотребления в Китае и Казахстане [1, 2] их установление приобретает особое значение, поскольку позволяет научно обосновать допустимые объемы изъятия стока, обеспечивающие сохранение устойчивого функционирования водных и пойменных экосистем.

Разработка таких критериев требует совместного анализа изменений гидрологического режима и определения параметров экологического стока. Анализ изменений гидрологического режима позволяет количественно оценить трансформацию стока, однако сам по себе не определяет экологически допустимые пределы его использования. В свою очередь, оценка экологического стока позволяет установить экологически необходимые параметры водного режима, но прежде всего требует надежной гидрологической основы. Поэтому в данной работе гидрологический анализ и оценка экологического стока рассматриваются как взаимодополняющие элементы разработки научно обоснованных рекомендаций по межгосударственному распределению стока р. Иртыш.

Анализ изменений гидрологического режима

Исходными материалами для анализа многолетних изменений стока р. Иртыш на участке р. Иртыш от государственной границы Китая и Казахстана до государственной границы Казахстана и Российской Федерации послужили сведения о месячном и годовом стоке за период наблюдений 1938–2023 гг. по данным ВНИИГМИ-МЦД, АИС ГМВО, Казгидромета, архивов ГГИ и МГУ. Анализ многолетних гидрологических рядов выполнен в соответствии с рекомендациями СП 529.1325800.2023.

Для анализа использованы материалы наблюдений четырех гидрологических постов на рассматриваемом участке р. Иртыш: с. Буран (1938–2022 гг.), ГЭС Усть-Каменогорская (1903–1961 гг. и данные по сбросам ГЭС после ее строительства), с. Татарка (1983–2023 гг.) и г. Омск (1923–2023 гг.). Рассматриваемый участок р. Иртыш и расположение гидрологических постов представлены на рисунке 1.

Пост с. Буран характеризует сток, поступающий в Казахстан из Китая, с. Татарка – сток вблизи российско-казахстанской границы. Ряд наблюдений по г. Омску использован для восстановления ряда по с. Татарке. Данные по Усть-Каменогорской ГЭС включают наблюдения до создания гидроузла и расходы через ГЭС после его строительства. Для оценки изменений режима стока сопоставлены условно-естественный период (до 1961 г.) и период регулирования (с 1968 г.) Период заполнения Верхне-Иртышских водохранилищ (1962–1967 гг.) не учитывался.

Анализ гидрологического режима включал продление стокового ряда р. Иртыш в створе с. Татарка за условно-естественный период до 1961 г., оценку изменений годового и сезонного стока в указанных створах наблюдений, а также внутригодового распределения стока в створах наблюдений за периоды до и после заполнения Верхне-Иртышских водохранилищ.

Пост с. Буран характеризует сток, поступающий в Казахстан из Китая, с. Татарка – сток вблизи российско-казахстанской границы. Ряд наблюдений по г. Омску использован для восстановления ряда по с. Татарке. Данные по Усть-Каменогорской ГЭС включают наблюдения до создания гидроузла и расходы через ГЭС после его строительства. Для оценки изменений режима стока сопоставлены условно-естественный период (до 1961 г.) и период регулирования (с 1968 г.) Период заполнения Верхне-Иртышских водохранилищ (1962–1967 гг.) не учитывался.

Анализ гидрологического режима включал продление стокового ряда р. Иртыш в створе с. Татарка за условно-естественный период до 1961 г., оценку изменений годового и сезонного стока в указанных створах наблюдений, а также внутригодового распределения стока в створах наблюдений за периоды до и после заполнения Верхне-Иртышских водохранилищ.

Для восстановления многолетнего ряда годового стока в створе с. Татарка использована регрессионная зависимость со створом г. Омск (рис. 2). Внутригодовое распределение стока определено по данным створа г. Омск для соответствующих лет.

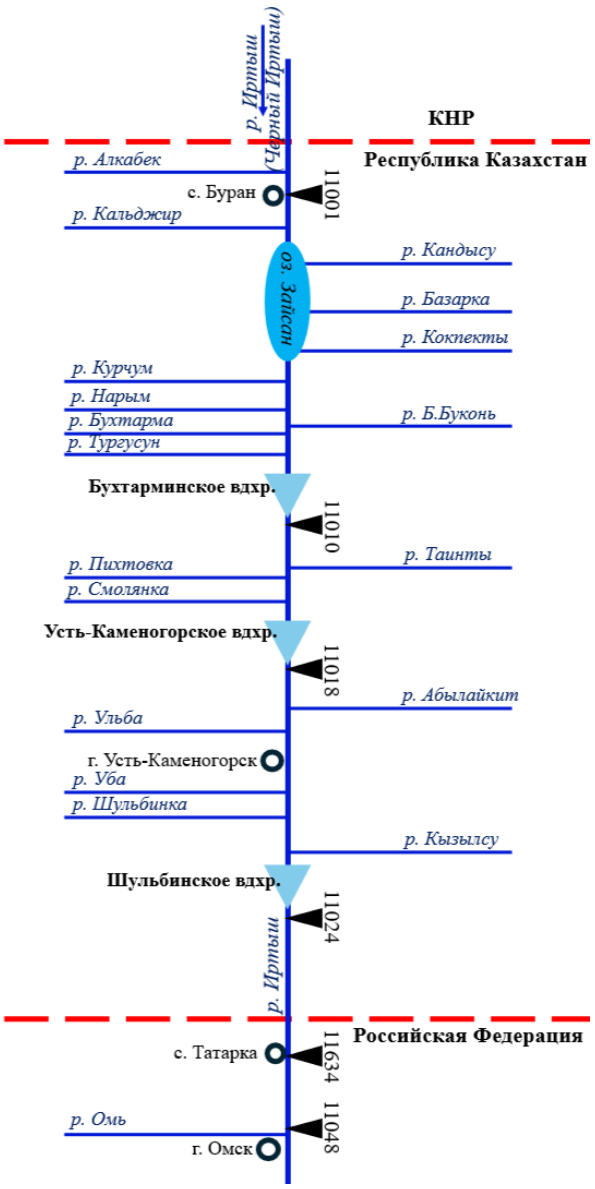


Рис. 1 – Схема рассматриваемого участка р. Иртыш и расположения гидрологических постов

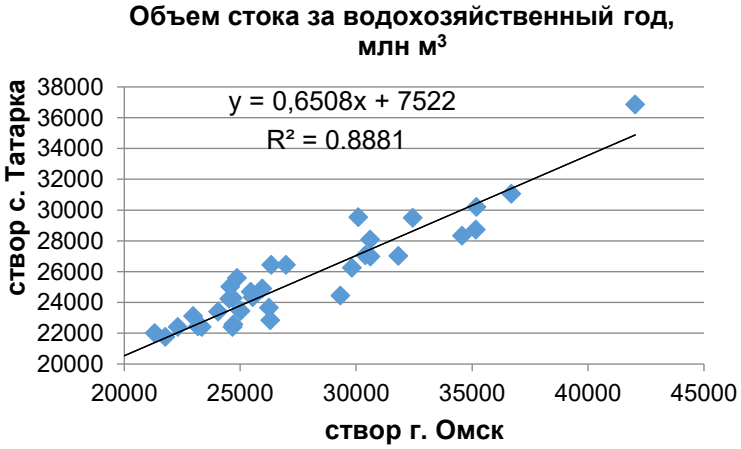


Рис. 2 – Зависимость объема годового стока р. Иртыш в створе с. Татарка от стока в створе г. Омск

Сравнение условно-естественного периода (до 1961 г.) и периода регулирования (с 1968 г.) позволило оценить изменения среднегодового стока и его межгодовой изменчивости.

После завершения заполнения Верхне-Иртышских водохранилищ произошло снижение среднегодового стока во всех рассматриваемых створах: в створе г. Омск – на 7,5 % (с 29,5 до 27,3 км³), с. Татарка – на 5 % (с 26,2 до 25,0 км³), ГЭС Усть-Каменогорская – на 9 % (с 19,6 до 17,9 км³), с. Буран – на 15,5 % (с 10,3 до 8,7 км³). Снижение среднегодового стока обусловлено регулированием стока, увеличением водопотребления, в том числе за счет заборов воды в канал Иртыш-Караганда, и другими антропогенными факторами.

Во всех створах, кроме с. Буран, отмечено также снижение межгодовой изменчивости стока, обусловленное регулирующим влиянием Верхне-Иртышских водохранилищ.

Наиболее выраженные изменения связаны с внутригодовым распределением стока. Так, в весенне-летний период (апрель–август) в створе г. Омск объем стока уменьшился на 20 % (с 20,5 до 16,5 км³), в створе с. Татарка – на 20 % (с 18,3 до 14,6 км³), в створе с. Буран – на 17 % (с 8,2 до 6,8 км³).

В осеннюю межень (сентябрь–ноябрь) изменения стока выражены значительно слабее. В створе г. Омск объем стока уменьшился на 3,6 % (с 5,5 до 5,3 км³), в створе с. Татарка увеличился на 4 % (с 4,9 до 5,1 км³). В створе с. Буран снижение составило 14 % (с 1,4 до 1,2 км³).

В период зимней межени (декабрь–март), напротив, отмечено существенное увеличение стока во всех рассматриваемых створах. В створе г. Омск объем зимнего стока увеличился на 62 % (с 3,4 до 5,5 км³), в створе с. Татарка – на 77 % (с 3,0 до 5,3 км³), в створе с. Буран – на 12 % (с 0,68 до 0,76 км³).

Для обобщенной характеристики изменений внутригодового распределения стока использован пост р. Иртыш – г. Омск, имеющий наиболее продолжительный ряд гидрологических наблюдений и отражающий суммарный эффект регулирования стока Верхне-Иртышским каскадом водохранилищ. На рис. 3 показана динамика годового и сезонного расхода, в таблице 1 приведены количественные оценки произошедших изменений.

Таблица 1 – Изменение внутригодового распределения стока р. Иртыш в створе г. Омск

Период	Объем стока, км^3				Доля сезона в годовом, %		
	за ВХ год	апрель-август	сентябрь - ноябрь	декабрь - март	апрель - август	сентябрь - ноябрь	декабрь – март
до 1961 г.	29,48	20,54	5,54	3,40	69,7	18,7	11,6
с 1968 г.	27,27	16,50	5,31	5,47	60,3	19,6	20,1
весь период	27,90	17,96	5,37	4,57	64,0	19,3	16,6
Разность: период 1- период 2, %	2,21 7,9	4,04 22,5	0,24 4,4	-2,07 -45,3	9,43 14,7	-0,98 -5,1	-8,45 -50,8

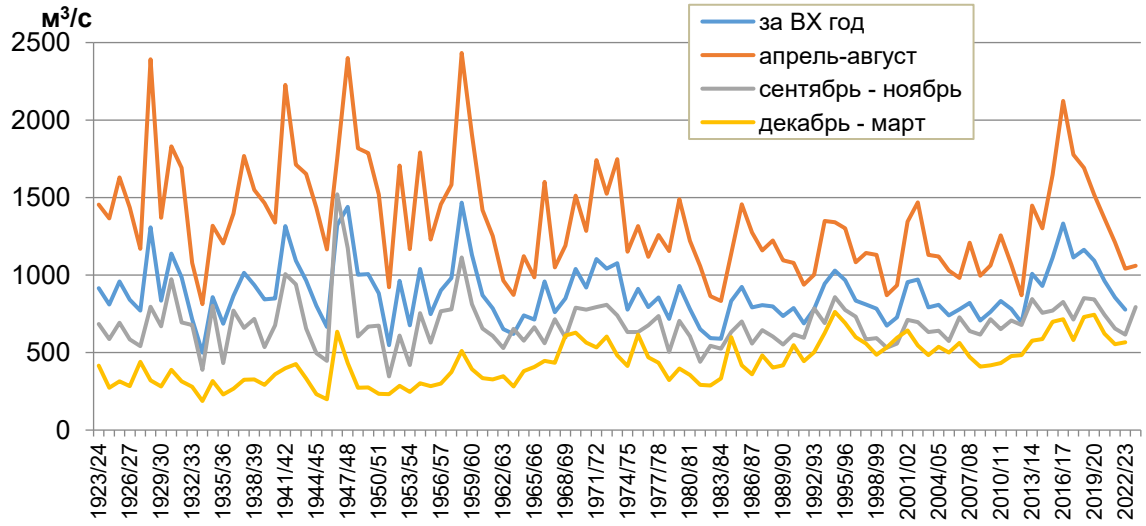


Рис. 3 – Динамика годовых и сезонных расходов р. Иртыш в створе г. Омск

Полученные результаты позволяют перейти от описания изменений гидрологического режима к определению экологически необходимых параметров водного режима и учету экосистемных требований.

Определение экосистемных требований и установление экологического стока

В мировой практике учёт экосистемных требований реализуется посредством разработки и реализации экологического стока, под которым в настоящей работе понимается водный режим, обеспечивающий поддержание водных и пойменных экосистем в условиях регулируемого стока и конкурирующих видов водопользования [3, 4].

Концепция экологического стока уже включена в законодательство ряда стран; в частности, новый Водный кодекс Республики Казахстан 2025 г. (ст. 39) определяет экологический сток как обязательную долю стока, подлежащую сохранению для поддержания водных экосистем с учётом сезонной и межгодовой изменчивости стока и особенностей конкретного речного бассейна.

Для рассматриваемого участка экологический сток направлен на сохранение экологически значимых характеристик гидрологического режима в условиях интенсивного регулирования стока. Несмотря на длительное антропогенное воздействие, водные экосистемы среднего Иртыша сохраняют сложную структуру, хотя уже демонстрируют признаки деградации [5]. Это свидетельствует о сохранении потенциала их устойчивого функционирования при поддержании экологически значимых характеристик гидрологического режима. Сокращение частоты и продолжительности затопления поймы ограничивает обводнение пойменных экосистем, а предусмотренные природоохранные попуски из Шульбинского водохранилища не всегда обеспечивают необходимые гидрологические условия, что приводит к деградации пойменных территорий и снижению их биопродуктивности [6, 7].

Основными функциями экологического стока на рассматриваемом участке р. Иртыш являются:

• сохранение необходимой доли стока, обеспечивающей поддержание водных экосистем;

• поддержание условий устойчивого функционирования ценных пойменных экосистем, наиболее чувствительных к изменениям гидрологического режима.

Экологический сток также может способствовать самоочищению реки, что особенно актуально для Иртыша в условиях трансграничного загрязнения тяжёлыми металлами [8], однако этот эффект рассматривается как сопутствующий, а не основной.

Для количественного определения параметров экологического стока применен метод критических гидрологических условий, позволяющий определить минимально допустимый объем стока, обеспечивающий поддержание функционирования водных и пойменных экосистем [9]. В качестве ключевого индикатора принят показатель обводнения поймы, что обусловлено высокой экологической значимостью пойменных экосистем рассматриваемого участка. Критические гидрологические условия определялись по годам минимального затопления поймы, характерным для маловодных периодов. Расчеты выполнены для приграничного створа р. Иртыш – с. Татарка.

Анализ критических гидрологических условий по данным маловодных лет (1983, 1984, 2011 и 2012 гг.) показал, что критическая величина годового стока составляет 19,5 км³, что соответствует обеспеченности 92 % по условно-естественному ряду и определяет порог возникновения критических условий обводнения поймы. На основании критического стока экологически допустимое безвозвратное изъятие определено в объеме 5,0 км³, или около 19 % среднемноголетнего стока. Соответственно,

экологический сток для рассматриваемого участка оценивается на уровне около 80 % естественного годового стока.

Рассчитанные значения экологического стока и экологически допустимого безвозвратного изъятия для лет различной обеспеченности приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Экологически допустимое изъятие и экологический сток р. Иртыш на границе России и Казахстана

Обеспеченность стока, %	Годовой сток, км^3	Допустимое безвозвратное изъятие, км^3	Доля допустимого безвозвратного изъятия от годового стока, %	Экологический сток, км^3	Доля экологического стока от годового, %
25	27,2	5,2	19	22,0	81
50	25,5	4,9	19	20,6	81
75	23,9	4,6	19	19,3	81
95	16,7	3,2	19	13,5	81

Поскольку среднегодовой сток в приграничном створе изменился незначительно – с 26,2 до 25,0 км³, годовую величину экологического стока предлагается сохранить на уровне около 80 % годового стока, установленном для условно-естественного периода.

Помимо сохранения годового экологического стока предлагается обеспечить объем стока за многоводный период не ниже 80 % условно-естественного режима, поскольку именно в этот период наблюдаются ключевые гидроэкологические последствия регулирования, в частности сокращение затопления поймы.

Анализ лет лимитирующих условий, когда затопление поймы происходило, но носило кратковременный характер и ограничивало функционирование экосистем, а также лет со сходными характеристиками половодья (1992 и 1999 гг.) показал, что при объеме майского стока свыше 4 км³ вероятность затопления поймы существенно возрастает, поэтому данная величина принята в качестве лимитирующего гидрологического критерия.

Для зимнего периода разработка режима экологического стока признана нецелесообразной ввиду невозможности изменения существующего режима регулирования Верхне-Иртышского каскада водохранилищ. Для осеннего периода отдельные рекомендации также не предлагаются, поскольку изменения стока оказались незначительными.

На основании выполненного анализа предложены параметры режима экологического стока, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 – Основные параметры предлагаемого режима экологического стока

Параметр режима экологического стока	Рекомендуемое значение	Экологическое значение
Годовой сток	≥ 80% от годового объёма	Поддержание функционирования водных экосистем
Многоводный период (апрель–август)	≥ 80% условно-естественного стока	Обеспечение условий функционирования пойменных экосистем
Май (пик половодья)	> 4 км³	Обеспечение выхода воды на пойму

Предлагаемый режим не предполагает восстановления естественного гидрологического режима, а направлен на сохранение его экологически значимых характеристик, прежде всего режима половодья. Предложенные параметры режима согласуются с действующими рекомендациями ПИВР Верхне-Иртышского каскада ГЭС, предусматривающими обводнительные попуски обеспеченностью 75 % при объеме около 4,8 км³ [10].

Заключение

Предложенный подход объединяет результаты гидрологического анализа и оценки экосистемных требований и формирует количественную основу для научно обоснованного межгосударственного распределения стока р. Иртыш. Полученные результаты могут использоваться при согласовании планов развития водопользования, установлении экологически допустимых объемов изъятия стока и решения вопросов, возникающих при реализации Соглашения между Правительством Республики Казахстан и Правительством Российской Федерации о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов от 7 сентября 2010 г.

Список литературы

1. 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.

2. Концепция развития системы управления водными ресурсами Республики Казахстан на 2024–2030 годы // Юридический сборник / Международный фонд спасения Арала, Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия Центральной Азии, Научно-информационный центр. — Ташкент: НИЦ МКВК, 2024. — № 59.

3. Dyson, M., Bergkamp, G., and Scanlon, J., (eds.). Flow. The Essentials of Environmental Flows, 2nd Edn. Gland: IUCN, 2008.

4. 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. V. 6. 15 p. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00045.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В. Оценка поступления тяжелых металлов в реку Иртыш и ее притоки с водосборной площади // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 1 (72). С. 73–85. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-73-85.

9. 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.

10. Правила использования водных ресурсов Верхне-Иртышского каскада водохранилищ / Министерство энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан, Казгидропроект, Казгидро. – Алматы: 2001. – 63 с.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ В ОРОШАЕМОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

Новиков А.А., *Кружилин И.П.*
Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова», г. Волгоград
novikov@riagro.ru

Аннотация: В статье рассматриваются направления повышения эффективности расходования воды в орошаемом земледелии. При возрастающей потребности в продовольствии связанного с ростом населения мира и усилением засушливости климата орошение является ключевым фактором стабильного производства продовольствия. Проанализированы прогнозные сценарии изменения площадей

мелиорируемых земель и водозабора для ирригации. Уделено внимание современному состоянию мелиоративного фонда России, проблемам его неэффективного использования и значительным потерям воды при транспортировке. Предложены технико-технологические направления повышения продуктивности орошаемых агроценозов, включая внедрение автоматизированных систем капельного полива, новых дождевальных машин и научно обоснованных водосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур при орошении.

Ключевые слова: орошаемое земледелие, водные ресурсы, КПД оросительных систем, водосберегающие технологии, продуктивность агроценозов.

EFFICIENCY OF WATER USE IN IRRIGATED AGRICULTURE

Novikov A.A., Kruzhilin I.P.,
The All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture is a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov", Volgograd
novikov@vniioz.ru

Annotation: The article discusses ways to increase the efficiency of water consumption in irrigated agriculture. With the increasing need for food associated with the growth of the world's population and the increasing aridity of the climate, irrigation is a key factor in sustainable food production. The forecast scenarios of changes in the areas of reclaimed land and water intake for irrigation are analyzed. Attention is paid to the current state of the Russian land reclamation fund, the problems of its inefficient use and significant losses of water during transportation. Technical and technological directions for increasing the productivity of irrigated agrocenoses are proposed, including the introduction of automated drip irrigation systems, new sprinklers and scientifically proven water-saving technologies for crop cultivation during irrigation.

Keywords: irrigated agriculture, water resources, efficiency of irrigation systems, water-saving technologies, productivity of agrocenoses.

Введение

Обеспечение продовольствием постоянно растущего населения планеты напрямую зависит от продуктивности аграрного сектора. Сельскохозяйственные угодья с искусственным орошением обеспечивают производство стабильных и высоких объемов продовольственного сырья. Согласно современным прогнозным оценкам [1], к 2050 году общемировая площадь ирригационных земель может увеличиться с 287 млн га (2005–2007 гг.) до 318 млн га. При этом прирост практически полностью будет обеспечен государствами развивающегося мира, где этот показатель вырастет с 219 до 251 млн га (+15%). Вместе с расширением орошаемых территорий прогнозируется и рост забора воды на нужды ирригации – с 2620 км³ до 2906 км³ к 2050 году. При этом в развивающихся странах ожидается увеличение водозабора на 298 км³, тогда как в развитых государствах – его сокращение на 12 км³.

Несмотря на то, что Россия относится к числу государств, наиболее обеспеченных водными ресурсами (как по абсолютным запасам, так и на душу населения), их территориальное распределение крайне неравномерно и не всегда благоприятствует развитию орошения. К тому же существующая практика водопользования характеризуется низкой эффективностью [2].

В Российской Федерации мелиорированные земли занимают не более 5% от общей площади сельхозугодий и около 8% пашни, однако их потенциал используется далеко не в

полной мере. Почти 0,9 млн га (или 19,3%) орошаемых площадей выведены из активного сельскохозяйственного оборота, главным образом вследствие вторичного засоления и подтопления [3]. Именно на орошаемых угодьях сосредоточено производство до 70% овощей, практически всего риса и более 20% кормовых культур. Учитывая, что около 80% сельскохозяйственных угодий страны находятся в зоне рискованного земледелия с дефицитом и неустойчивостью атмосферного увлажнения, частыми засухами и суховеями, развитие аграрного сектора невозможно без внедрения комплексных мелиораций, в т ч орошения.

По данным статистического сборника «Охрана окружающей среды в России. 2024» за период 2019–2023 гг. объем воды, используемой для орошения сельхозкультур, обводнения пастбищ и сельскохозяйственного водоснабжения, составлял 7,5–6,3 км³, что соответствует 17,7–15,6% от общего водопотребления в стране. Вместе с тем эти показатели в 2,0–2,6 раза уступают уровням 1990-х годов, когда водозабор для нужд агропромышленного комплекса достигал 17,5 км³ (22–23% суммарного водозабора).

Коллективом исследователей [5] предложены три альтернативных сценария развития водохозяйственного сектора страны. В соответствии с ними, площадь орошаемых земель к 2025 году могла бы составить 10,8 млн га (оптимистичный вариант), 9,0 млн га (реалистичный) или 4,8 млн га (пессимистичный). При этом расчетный объем забора воды для орошения к 2020 г. оценивался не менее 14,6 км³.

Одной из наиболее острых проблем остается высокий уровень потерь воды при транспортировке, который, по оценкам специалистов [6], ежегодно составляет 4–5 км³. В связи с этим одним из приоритетных направлений становится повышение коэффициента полезного действия оросительных систем и систем водоснабжения с нынешних 0,6–0,8 до 0,95, что позволит сократить непроизводительные расходы воды в сельском хозяйстве в 2,5–3,0 раза.

Повышение эффективности ирригационного водопользования может быть достигнуто комплексом мер.

Внедрение водосберегающих систем полива, прежде всего капельного орошения, демонстрирует высокий водоэкономический эффект, особенно при возделывании овощных культур, картофеля, плодовых насаждений и виноградников. По данным ВНИИОЗа экономия поливной воды при использовании таких систем составляет 30–35% и более.

Значительный ресурсосберегающий потенциал имеют и новые модели дождевальной техники – «Ахтуба», «Казанка», «Кубань-ЛК», «Кубань-ЛШ», «Ладога» и др., прошедшие успешные испытания на базе ОС «Орошаемая» ВНИИОЗ. Их

применение практически полностью исключает поверхностный сток, предотвращает развитие ирригационной эрозии и позволяет довести КПД систем до 0,95–0,98 4,54,5.

Совершенствование системы управления дождевальной техникой, переход от автоматизированных к интеллектуальным системам управления поливами; разработка аппаратуры и компьютерного обеспечения для прецизионного орошения с интенсивностью полива, равной текущему водопотреблению культуры. Данное направление позволяет сократить разрыв между заданной и фактической нормой полива до 2,3-3,6% в отличие от существующих 7-10 %. Современные цифровые устройства позволяет реализовать нейроуправление практически на любой дождевальной машине, и, таким образом, оптимизируются параметры полива и уменьшаются затраты электроэнергии и воды [6, 7].

Наряду с техническим переоснащением, важнейшим средством экономии воды служит переход к научно обоснованным, адаптированным к местным условиям, технологиям выращивания культур, обеспечивающих высокую их продуктивность.

За счет внедрения научно-обоснованных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, разработанных во ВНИИОЗ и других научных учреждениях, продуктивность орошаемого гектара удалось повысить от 3,0-3,5 тыс. к. ед. в 1970-е годы прошлого столетия, до 4,2 -4,5 тыс. к. ед. Для формирования такого уровня продуктивности агроценозов необходимо расходовать от 300 до 700 $м^3$ воды на 1 к. ед. Оросительные нормы для среднесухого года составляют 1700-2650 $м^3$ /га.

На этапе до 2000 г. учеными ВНИИОЗ созданы технологии и сконструированы системы орошаемого земледелия зерновой, зерно-кормовой, кормовой и овоще-кормовой специализации, обеспечивающие получение 7,0-7,5 тыс. к.ед./га севооборотной площади.

Начало 2000 годов характеризовалось массовым внедрением в орошаемое земледелие современных способов полива: дождевание и капельное орошение. По подтвержденным данным способ полива системами капельного орошения позволяет снизить расход агрохимикатов, повысить урожайность, а главное, существенно сократить расход оросительной воды. Одновременно внедрялись современные дождевальные машины с усовершенствованным дождевым поясом и пониженной интенсивностью дождя, не допускающей образование ирригационного стока, что также позволяло обеспечить эффективное расходование воды.

На новой материально технической базе были усовершенствованы существующие, а также разработаны новые технологии возделывания сельскохозяйственных культур. Сконструированные на их основе системы земледелия позволили получать 10,0-10,5 тыс.

к.ед. с гектара. Оросительные нормы при этом составляли 2250-3050 $м^3$ /га, а формирование 1 тысячи кормовых единиц урожая обеспечивалось расходованием 300-600 куб метров воды.

В настоящее время благодаря использованию новых сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, в том числе отечественной селекции, научно-обоснованного чередования культур, систем обработки почвы, удобрений и современных систем защиты растений, в том числе биологизированных, ученым Всероссийского НИИ орошаемого земледелия удалось создать системы орошаемого земледелия, обеспечивающие продуктивность 1 орошаемого гектара на уровне 13,00 – 15,00 тыс к.ед. Во ВНИИОЗ разработаны и прошли производственную апробацию новые водосберегающие режимы орошения, позволяющие получать урожайность на уровне 12–15 т/га зерна кукурузы, 100 т/га зеленой массы люцерны или суданской травы, 60 т/га бобово-злаковых смесей, 40 т/га картофеля и до 150 т/га корнеплодов кормовой свеклы. Благодаря росту продуктивности сельскохозяйственных культур, применения современных способов полива, удалось существенно повысить эффективность использования оросительной воды. Сегодня на создание 1 тысячи кормовых единиц расходуется от 200 до 410 кубических метров оросительной воды. Оптимизация водоподачи при этом базируется на строгой увязке оросительных и поливных норм с планируемой урожайностью, погодными условиями вегетационного периода, водно-физическими характеристиками почв и применяемой техникой полива.

Заключение

Орошаемое земледелие было, есть и остается инструментом повышения продуктивности сельскохозяйственных земель и гарантированного производства достаточных объемов продовольственного сырья.

Повышение потребности в продовольствии, усиление засушливости климата, обострение водного стресса и дефицита пресной воды в сельскохозяйственных регионах мира, снижение доступности пресной воды для орошения актуализирует поиск путей рационального использования оросительной воды.

Учеными разработаны технологии возделывания сельскохозяйственных культур, позволяющие обеспечить продуктивность орошаемого гектара на уровне 13,0-15,0 тыс. к. ед./га. Применение научно-обоснованных технологий выращивания позволяет затрачивать на производство 1 тыс. к. ед. 200-410 $м^3$ оросительной воды что почти вдвое повышает эффективность ее расходования.

Список литературы

1. Bruinsma J. The Resource Outlook to 2050. FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. Rome, 24–26 June 2009 [Электронный ресурс]. — http://www.fao.org/3/a-ak971e.pdf (дата обращения 14.08.2026).

2. Кружилин, И. П. Водосбережение в орошаемом земледелии / И.П. Кружилин, А.А. Новиков, А.Г. Болотин // Роль мелиорации земель в реализации государственной научно-технической политики в интересах устойчивого развития сельского хозяйства: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия, Волгоград, 06–09 сентября 2017 года. – Волгоград: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия", 2017. – С. 43-49. – EDN UPAYWL.

3. Колганов, А. В. Потенциал мелиорированных земель России / А. В. Колганов, Р. С. Масный, Г. Т. Балакай // Мелиорация и гидротехника. – 2026. – Т. 16, № 1. – С. 1-18. – DOI 10.31774/2712-9357-2026-16-1-1-18. – EDN JLMEVA.

4. Куленцан, А. Л. Анализ использования свежей воды в Российской Федерации / А. Л. Куленцан, Н. А. Марчук // Российский химический журнал. – 2022. – Т. 66, № 2. – С. 71-77. – DOI 10.6060/rcj.2022662.11. – EDN FUPDWI.

5. Демин, А. П. Прогноз водопотребления в российской части бассейна Дона / А. П. Демин, А. В. Зайцева // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48, № 5. – С. 588-598. – DOI 10.31857/S0321059621050084. – EDN RKWKFR.

6. Дубенок Н.Н., Болотин Д.А., Новиков А.А., Болотин А.Г. Эффективность использования водных ресурсов в орошаемом земледелии // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2018.–№3(51). –С.83−90

7. Кирейчева, Л. В. Основные направления водосбережения в орошаемом земледелии России / Л. В. Кирейчева // Мелиорация и водное хозяйство. – 2024. – № 4. – С. 79-82. – EDN LJTZCL.

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ИРИКЛИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ И В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Головачева М.М.
Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ФГБУ РосНИИВХ), г. Ростов-на-Дону
E-mail: mariya_200218@mail.ru

Аннотация: В условиях неполной информации и в условиях неопределенности управление режимом работы водохранилища становится достаточно сложной задачей. Действующая методология

управления режимами работы водохранилищ в период прохождения половодий предполагает несколько ступеней подготовки прогнозов и принятия на их основе управляющих решений на очередной временной период. Подобная схема в полной мере характерна для Ириклинского водохранилища, в связи с чем на ее примере возможно распространение методологии управления на другие водохранилища. Для Ириклинского водохранилища до начала половодья разрабатываются и представляются следующие виды прогнозов: предварительный, основной и уточняющие. Моделирование режима работы Ириклинского водохранилища напрямую связано с видами этих прогнозов, содержит их специфические особенности и позволяет предлагать варианты режимов работы водохранилищ даже при предварительной подготовке к половодью и с учетом всех имеющихся данных и ограничений.
Ключевые слова: Ириклинское водохранилище, режим работы водохранилища, предполоводная сработка, половодье, прогноз.

MANAGING THE IRIKLINSKY RESERVOIR'S OPERATING MODE IN INCOMPLETE INFORMATION'S CONDITIONS AND UNCERTAINTY

Golovacheva M.M.
Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-on-Don
E-mail: mariya_200218@mail.ru

Abstract: In incomplete information's conditions and uncertainty, the management of the reservoir operation mode becomes a rather difficult task. The current methodology for managing reservoir operating modes during the spring flood several stages of preparing forecasts and making management decisions based on them for the next period. Such a scheme is fully characteristic of the Iriklinsky reservoir, and therefore, using its example, it is possible to extend the management methodology to other reservoirs. The following types of forecasts are developed and submitted for the Iriklinsky reservoir before the spring flood: preliminary, basic and clarifying. Modeling the operating mode of the Iriklinsky reservoir is directly related to the types of these forecasts, contains their specific features and allows us to propose options for reservoir operating modes even with preliminary preparation for the spring flood and considering all available data and limitations.
Keywords: Iriklinsky reservoir, reservoir operation mode, pre-flood drawdown, spring flood, forecast.

Действующая методология управления режимами работы водохранилищ в период прохождения половодий и паводков предполагает несколько ступеней подготовки прогнозов и принятия на их основе управляющих решений на очередной временной период. Как правило, территориальными органами ГМС поэтапно представляются следующие виды прогнозов: предварительный, уточняющий и основной. На основе предварительного прогноза половодья, содержащего данные об объемах ожидаемых половодий (минимальные, максимальные значения), имеющего значительную неопределенность, определяется предварительный режим работы водохранилища, который реализуется до поступления уточняющего или основного прогнозов. При поступлении основного прогноза, содержащего расширенный состав элементов (уточненные объемы половодья, даты прохождения половодья, максимальный расход и дата его прохождения), корректируется режим работы водохранилища на оставшийся период половодья с учетом фактического состояния водохранилища (отметка, объем) на начало корректировки по данным основного прогноза, при этом учитывается оставшаяся часть объема половодья относительно основного прогноза. В дальнейшем возможно поступление уточняющих прогнозов половодий (зачастую уточняются отдельные

элементы прогнозов половодий) как в предполоводный период, так и непосредственно в период пропуска половодий.

Данная форма представления прогнозов в период прохождения половодий предполагает возможность создания системы управления режимом водохранилища на основе поступающих прогнозов, наличия базы знаний, содержащей существующую обширную информацию о водохранилищах (параметры, материалы ПИВР, Схемы КИОВО, базы гидрологических данных, данные проектных материалов, данные эксплуатирующих организаций, ретроспективные сведения о режимах работы водохранилищ и т.д.). Подобная схема в полной мере характерна для Ириклинского водохранилища, в связи с чем на ее примере возможно распространение методологии управления на другие водохранилища.

Ириклинское водохранилище расположено на территории Оренбургской области, створ плотины находится в 83 км выше (по реке) от г. Орска, в 1810 км от устья реки, площадь водосбора в створе гидроузла 36900 км^2 [1], Ириклинское водохранилище ведет глубокое многолетнее регулирование стока р. Урал (таблица 1).

Таблица 1 – Основные характеристики водохранилищ на р. Урал[7]

Наименование показателей	Единица измерения	Ириклинское
Нормальный подпорный уровень (НПУ)	м	245,00
Минимальный допустимый уровень, уровень мертвого объема (УМО)	м	228,00
Максимальный допустимый уровень, форсированный подпорный уровень (ФПУ)	м	247,60
Площадь зеркала водохранилища при НПУ	км^2	260
Площадь зеркала водохранилища при УМО	км^2	82,92
Полная статическая емкость водохранилища при НПУ, полный объем	млн. м^3	3257,0
Полная статическая емкость водохранилища при УМО, мертвый объем	млн. м^3	524,12
Полезный объем водохранилища при НПУ	млн. м^3	2732,88
Полный форсированный объем водохранилища, полная статическая емкость водохранилища при отметке ФПУ	млн. м^3	4044,26
Объем форсировки водохранилищ	млн. м^3	787,26

[7] Составлено автором на основе Основные положения правил использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища на р. Урале (РВ-185-73) / М-во мелиорации и водного хоз-ва РСФСР, Управление по регулированию использования водных ресурсов. — М., 1973. — 7 с.

Основное назначение Ириклинского водохранилища, определенное при его создании, водообеспечение ОАО «Уральская сталь», промышленности, населения городов Гая, Новотроицка и зоны прилегающей к р. Урал до г. Оренбурга (выше впадения р. Сакмара), а также орошения земель, сосредоточенных в основном в массиве, располагаемом на пойменных землях междуречья рек Урала и Кумака. Ириклинское водохранилище используется также в целях промышленного рыболовства, введено в постоянную эксплуатацию в 1966 г.

В настоящее время водные ресурсы Ириклинского водохранилища используются для обеспечения работы Ириклинской ГРЭС, забирающей воду из водохранилища, на попусках в нижний бьеф работает ГЭС установленной мощностью 30 МВт, водохранилище осуществляет срезку пиков высоких половодий в целях сокращения затоплений в городах Орск и Новотроицк. Ириклинское водохранилище дополнительно участвует в регулировании качества воды в р. Урал ниже городов Орска и Новотроицка (основных загрязнителей), а также в формировании благоприятного для воспроизводства осетровых рыб режима расходов в низовьях р. Урал. Возможное участие водохранилища в решении рыбохозяйственных проблем сводится к увеличению меженных, в первую очередь зимних, попусков за счет перераспределения отдачи в маловодные и избытков стока в многоводные годы без ущерба для основных потребителей. Акватория водохранилища используется для рекреационных целей.

Управление водными ресурсами Ириклинского водохранилища осуществляется в соответствии с Правилами использования водных ресурсов водохранилища (ПИВР), формализованным отображением которых является диспетчерский график. Наличие диспетчерских правил обеспечивает достаточно четкое принятие управляющих решений по режиму работы водохранилища при нахождении отметки наполнения водохранилища в каждый расчётный интервал времени в диспетчерских зонах сниженных и гарантированных отдач. Для зон избыточных отдач и максимальных сбросов отсутствуют четкие алгоритмы принятия решений по установлению величин отдач, назначение которых предполагает наличие прогнозной информации о приточности к водохранилищу, а в период половодья - информации о дате начала и объеме половодья, дате прохождения и величине максимального расхода половодья, получение которой является сложной задачей, требующей, в свою очередь, труднопрогнозируемой информации, например, о ходе суточных температур в период снеготаяния. По сути, перечисленные элементы прогноза половодья определяют форму его гидрографа и влияют на максимально допустимую отметку наполнения водохранилища на начало половодья, необходимость предполоводной сработки водохранилища, величину максимального сбросного расхода из водохранилища в период прохождения половодья.

Для Ириклинского водохранилища до начала половодья разрабатываются и представляются следующие виды прогнозов: предварительный, основной и уточняющие (рис. 1).

Предварительный прогноз, как правило, поступает в начале февраля и содержит предварительную информацию только об ожидаемых объемах (максимальный, минимальный) половодья и имеет высокую степень неопределенности, в связи с чем процесс управления становится более сложной задачей. Для ее решения необходимо выполнить ряд последовательных действий: определить обеспеченность объема половодья, осуществить поиск гидрографов-аналогов по указанному объема половодья, рассчитать средние даты прохождения половодий и максимальных расходов, построить модельные гидрографы, определить необходимость и объем предполоводной сработки и рассчитать режим работы Ириклинского водохранилища (рис. 2).

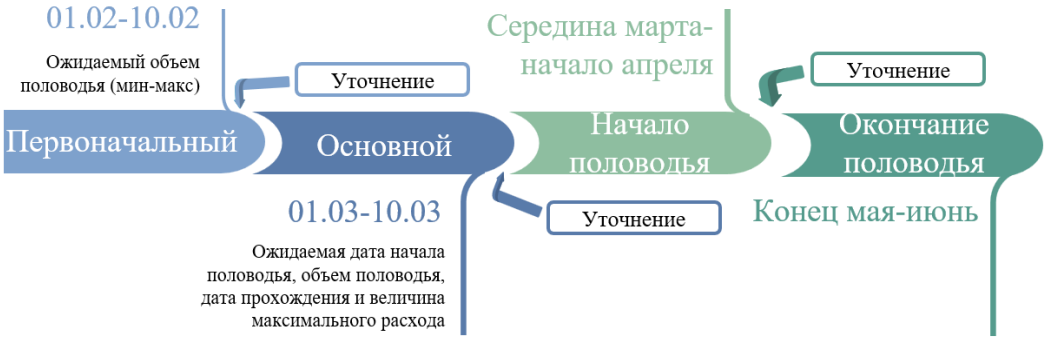


Рис. 1 – Виды и состав прогнозных элементов половодий[8]

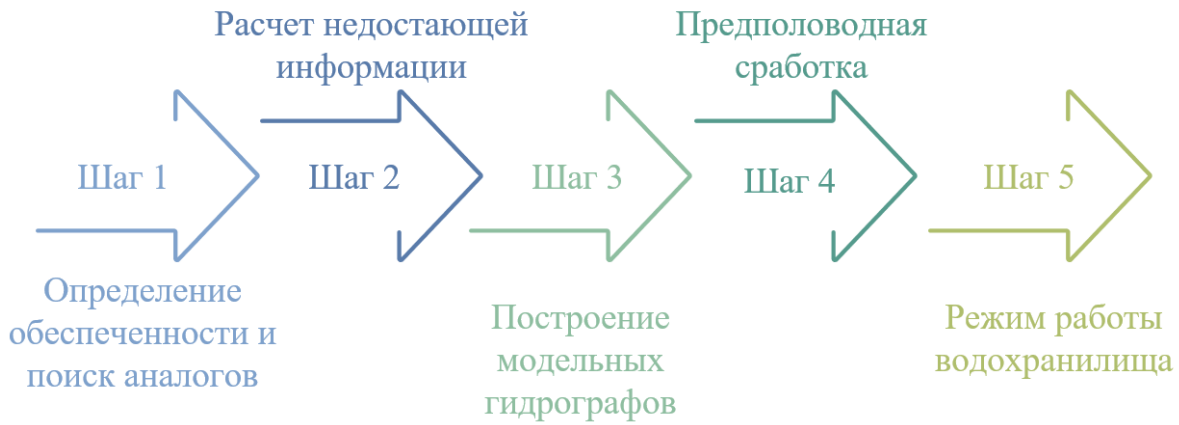


Рис 2. – Этапы расчета режима работы Ириклинского водохранилища[9]

На первом шаге для определения типа половодья: экстремальное (при обеспеченности ≤ 1%) и не экстремальное (при обеспеченности > 1%) - используется

[8] Составлено автором по материалам исследования
[9] Составлено автором по материалам исследования

кривая обеспеченности объемов половодья [1]. При попадании значений объема половодий в диапазон между точками кривой обеспеченности осуществляется кусочно-линейная интерполяция.

Поиск-годов аналогов осуществляется на основе имеющегося объема половодья, и недостаток информации в первоначальном прогнозе (отсутствие информации о сроках прохождения половодья и максимальных расходах) дополняется усредненными значениями среди аналогов (рис. 3, 4). Приточность в предполоводный период моделируется или на основе данных месячного прогноза, или, при их отсутствии, на основе усредненных значений.

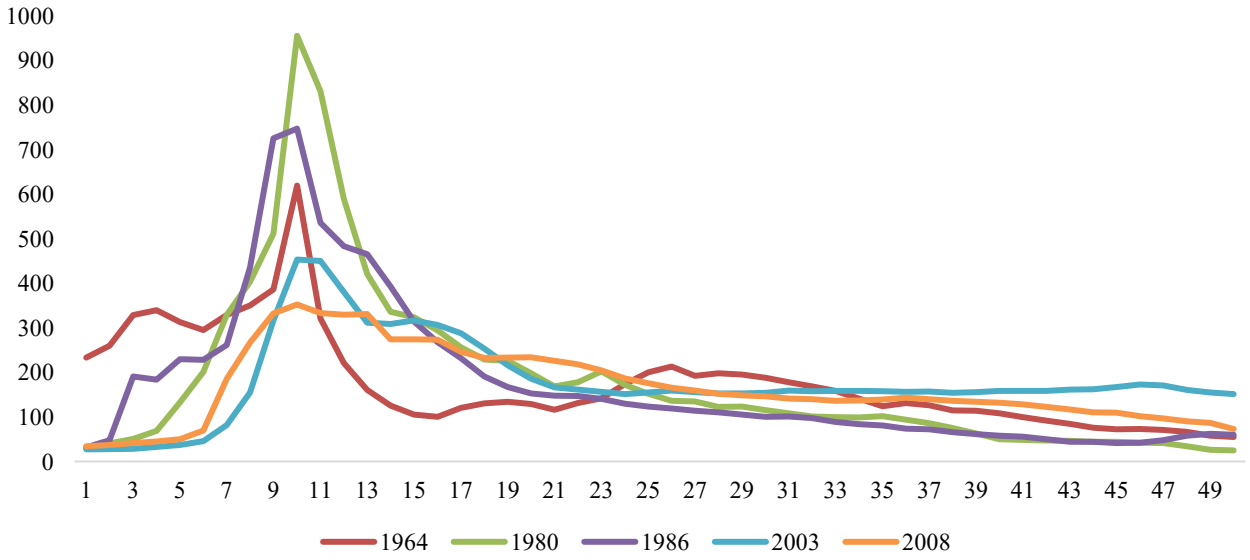


Рис. 3 – Гидрографы-аналоги половодья 60% обеспеченности Ириклинского водохранилища[10]

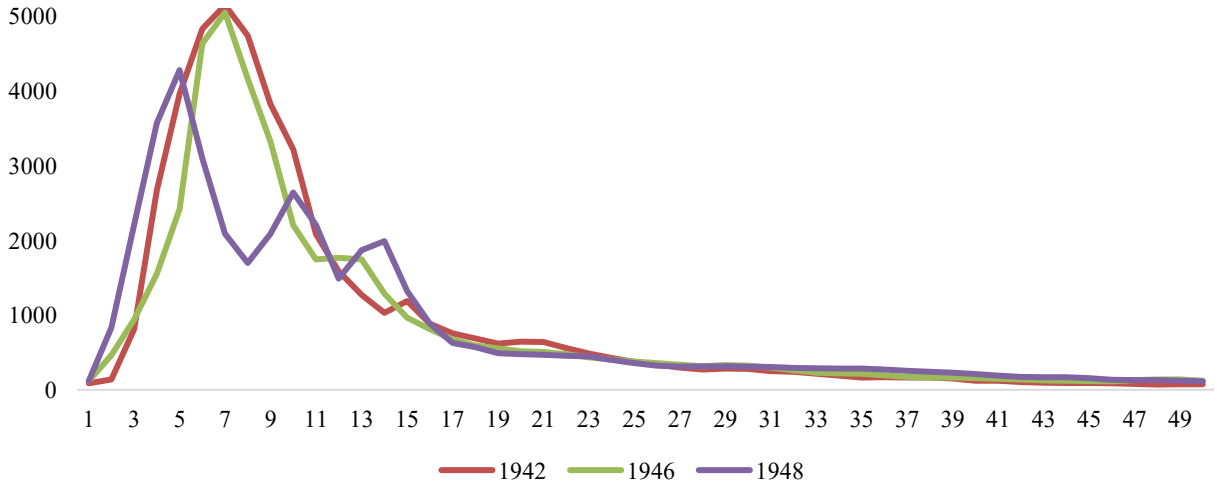


Рис. 4 – Гидрографы-аналоги половодья 1% обеспеченности Ириклинского водохранилища[11]

[10] Составлено автором по материалам исследования

[11] Составлено автором по материалам исследования

Для экстремального объема половодья осуществляется построение модельного гидрографа на основе свода правил [2]. Соответственно, количество модельных гидрографов зависит от количества найденных годов-аналогов и может варьироваться от 1 до нескольких (рис. 5).

Для неэкстремального объема половодья реализуется построение обобщенного гидрографа [2] с использованием в качестве максимального расхода в период прохождения половодья минимального, среднего и максимального среди годов-аналогов (рис. 6).

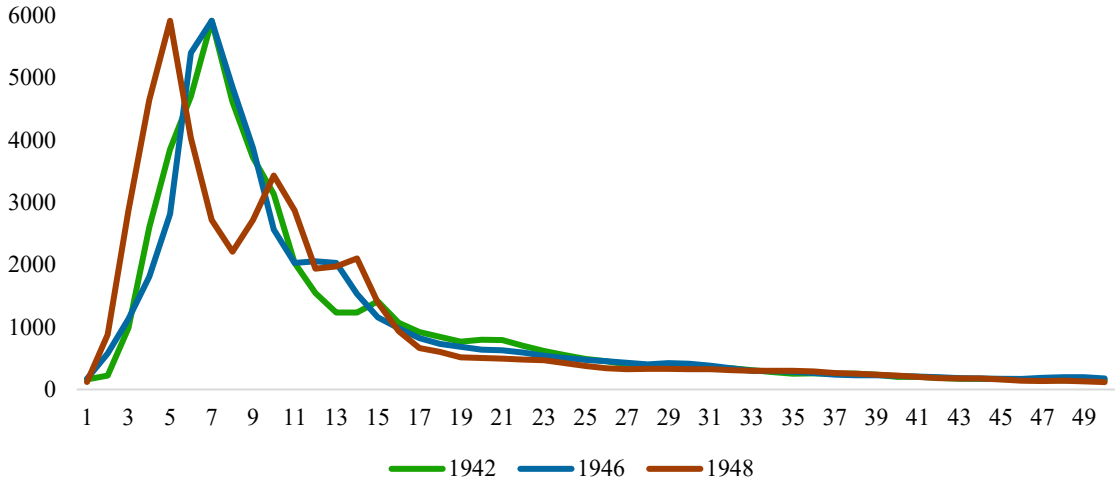


Рис. 5 – Модельные гидрографы 1% обеспеченности половодья (Q_{max} = 5910 м^3/с) Ириклинского водохранилища[12]

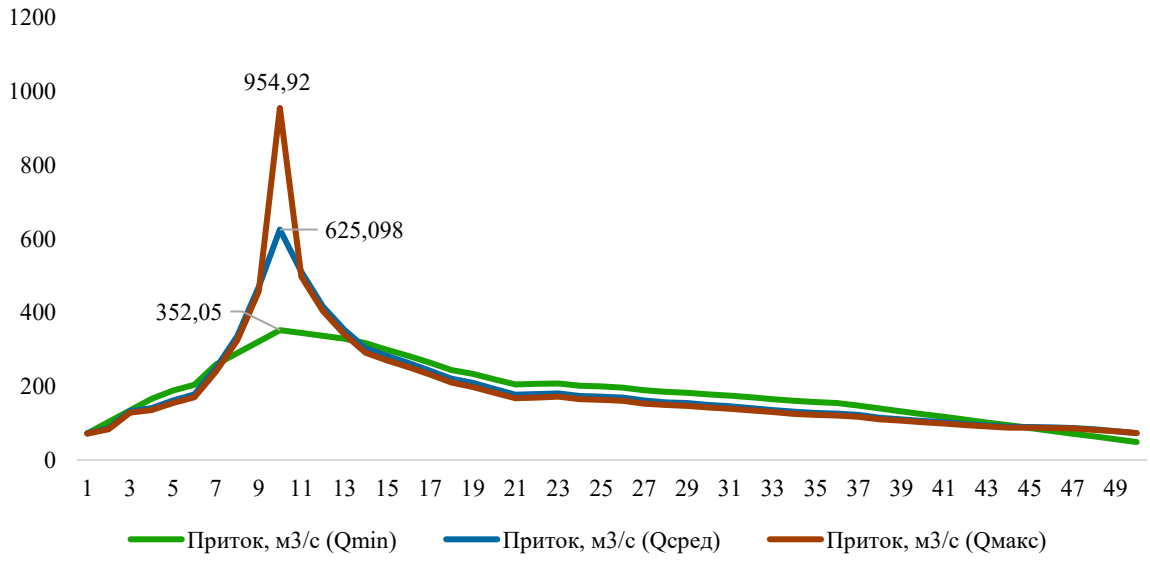


Рис. 6 – Модельные гидрографы 60% обеспеченности половодья для разных максимальных расходов Ириклинского водохранилища[13]

[12] Составлено автором по материалам исследования

[13] Составлено автором по материалам исследования

После построения гидрографов осуществляется определение необходимости и объема предполоводной сработки. Основная цель – достижение отметки не выше уровня принудительной предполоводной сработки (УПС), для Ириклинского водохранилища – 243.1 [ПИВР]. Объем принудительной предполоводной сработки сопоставляется с начальным объемом, соответствующему фактическому значению [3] на дату начала предполоводной сработки, при выявлении необходимости объем равномерно распределяется на период предполоводной сработки и устанавливается определенный если сбросной расход; необходимость отсутствует, то значения сбросного расхода в предполоводный период соответствуют зональным отдачам.

При расчете режима работы Ириклинского водохранилища устанавливаются основные цели управления водными ресурсами Ириклинского водохранилища при пропуске высоких половодий: сработка водохранилища не ниже допустимых отметок (в период предполоводной сработки для создания дополнительной свободной емкости), соблюдение диспетчерских отдач (не менее установленных Правилами), наполнение водохранилища до отметки НПУ без выхода на форсировку (рис. 7); и при пропуске низких половодий: достижение максимально возможного уровня наполнения водохранилища (рис. 8).

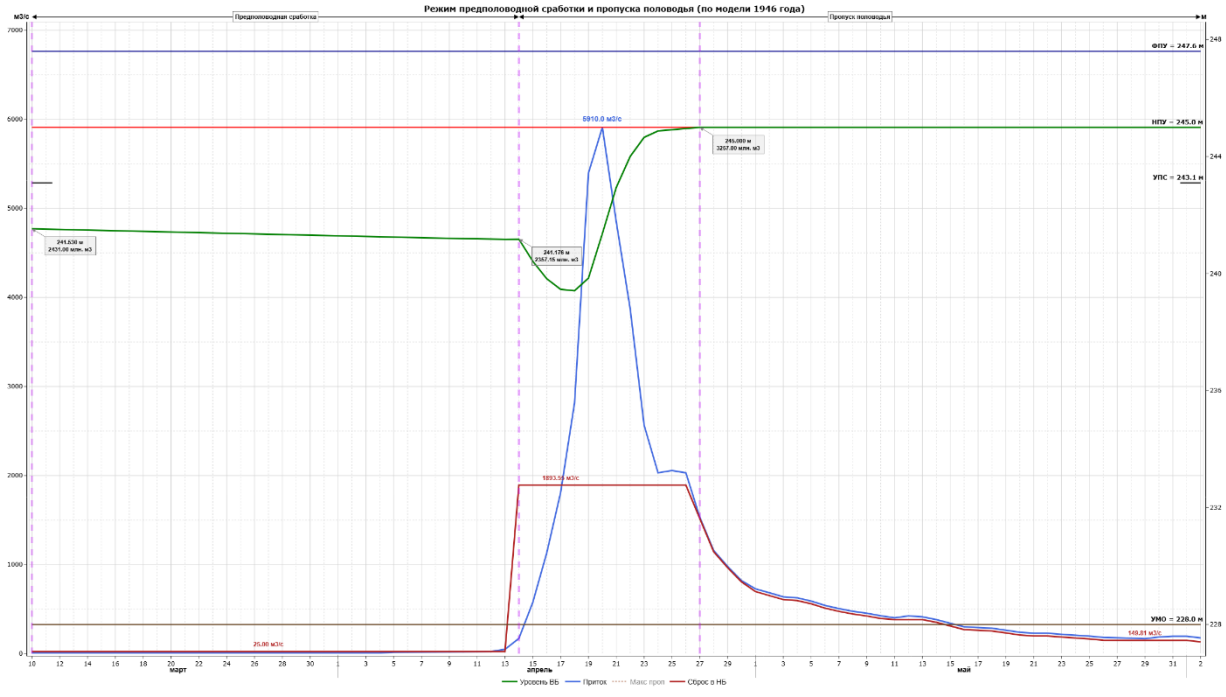


Рис. 7 – Режим работы Ириклинского водохранилища при пропуске высоких половодий[14]

14 Составлено автором по материалам исследования

Данные предварительного прогноза могут корректироваться Гидрометслужбой до поступления основного прогноза. При моделировании режима работы Ириклинского водохранилища с учетом корректировки осуществляется учет полученного на основе первоначально поступившегося прогноза объема водохранилища. Именно так появляется возможность моделирования различных сценариев при возможных кардинальных изменениях прогнозных данных.

Основной прогноз поступает, как правило, до середины марта и содержит данные об ожидаемых датах (ранняя - поздняя) начала половодья, объемах половодья (минимальный, максимальный), датах прохождения (ранняя - поздняя) и величинах максимального расхода (минимальный, максимальный). Для данного прогноза этапы моделирования режима работы Ириклинского водохранилища соответствуют предыдущему, но отличаются тем, что спектр предоставляемой информации расширяется и позволяет более точно приблизить полученный режим работы водохранилища к реально возможному (рис. 9).

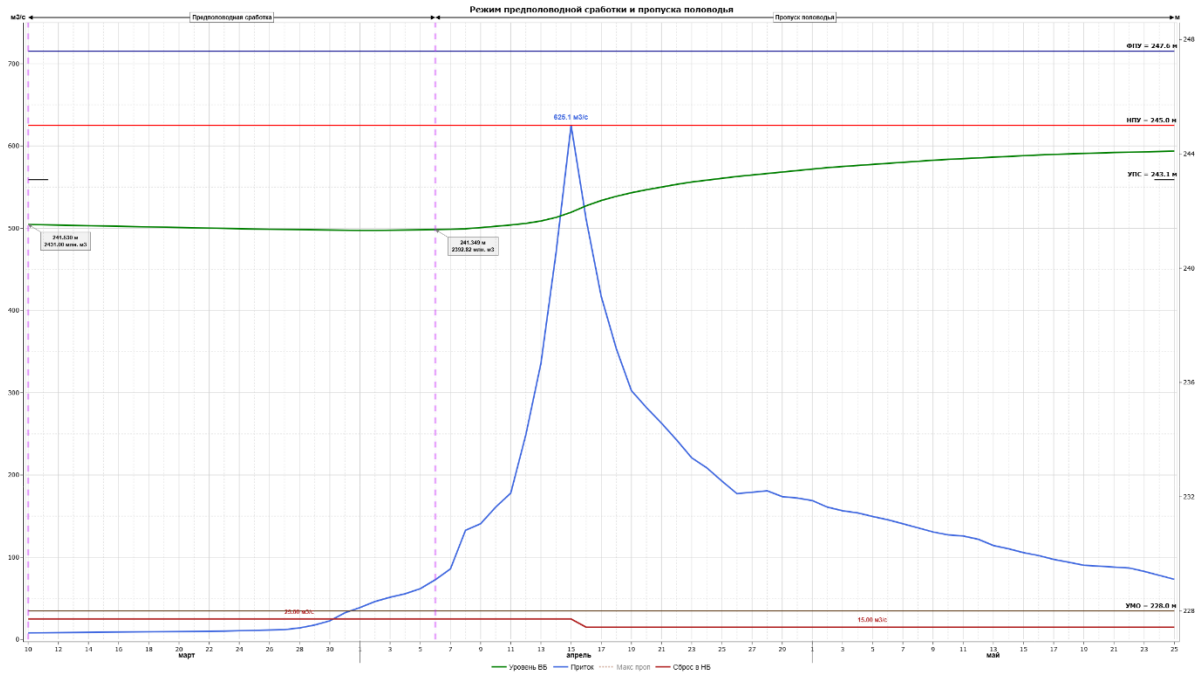


Рис. 8 – Режим работы Ириклинского водохранилища при пропуске низких половодий[15]

15 Составлено автором по материалам исследования

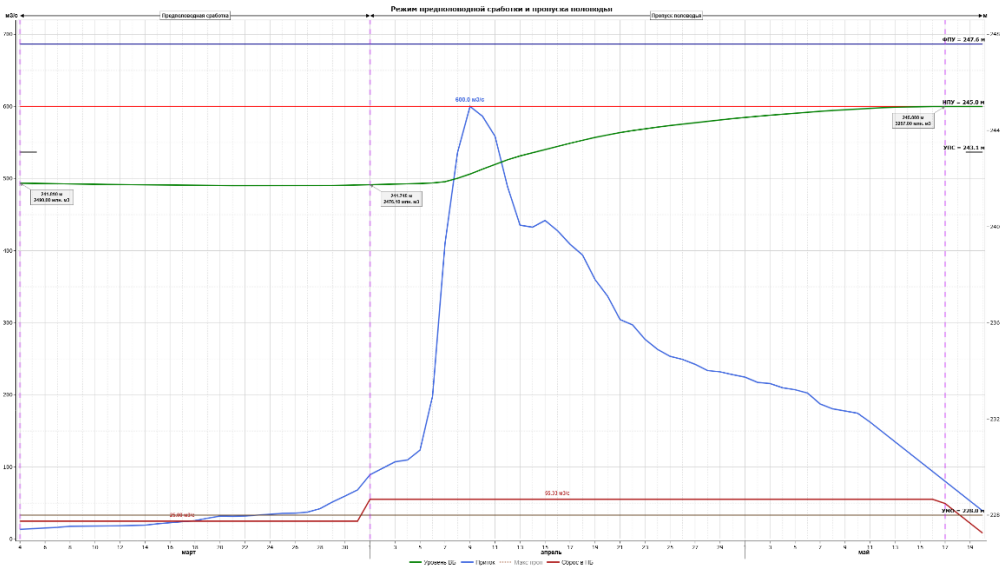


Рис. 9 – Режим предполоводной сработки и пропуска половодья Ириклинского водохранилища с учетом данных основного прогноза[16]

Поступление уточняющего прогноза возможно и в период прохождения половодья. В данном случае становится невозможным использования механизма определения объема предполоводной сработки и управление начинает носить повышенно оперативный характер. Преимуществом предложенного подхода выступает возможность моделирования режима работы Ириклинского водохранилища в условиях неполной информации и условиях неопределенности, а также возможность комбинации любых исходов и предоставление многовариантных расчетов. Это особенно актуально при кардинальном изменении прогнозных данных.

Таким образом, процесс моделирования режима работы Ириклинского водохранилища в период предполоводной сработки и при пропуске половодья подготавливать советующие решения в условиях различной гидрологической обстановки и может быть распространен на другие водохранилища.

Список литературы

1. Основные положения правил использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища на р. Урале (РВ-185-73) / М-во мелиорации и водного хоз-ва РСФСР, Управление по регулированию использования водных ресурсов. — М., 1973. — 7 с.

2. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. М.: Издание официальное, 2023, - 103 с.

3. Сегмент «Государственный мониторинг водных объектов» Государственной информационной системы «Цифровая платформа «Водные данные»». Журнал Ириклинского водохранилища

16 Составлено автором по материалам исследования

УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Цатурян М.Г., *Головачева М.М., Бабичев А.А., Косолапов А.А.*
Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ФГБУ РосНИИВХ), г. Ростов-на-Дону
E-mail: maria_tsaturyan@mail.ru

Аннотация: Перспективным направлением в области управления водными ресурсами является применение систем на базе искусственного интеллекта. В данной работе авторами предлагается использование ИИ-агента, представляющего собой систему, состоящую из графа, инструментов-функций с управляющими модулями и большой языковой модели (LLM), использующей RAG. Данный подход позволяет автоматизировать рутинные задачи, облегчить поиск информации о водохранилищах, анализировать фактическое и ретроспективное состояние водохранилищ и предлагает возможные варианты режимов работы водохранилищ на основе различных прогнозных данных.
Ключевые слова: управление водохранилищами, искусственный интеллект, ИИ-агент, LLM, RAG.

RESERVOIR MANAGEMENT USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ELEMENTS

Tsaturyan M.G., Golovacheva M.M., Babichev A.A., Kosolapov A.A.
Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-on-Don
E-mail: maria_tsaturyan@mail.ru

Abstract: A promising direction in the field of water resource management is the use of systems based on artificial intelligence. In this paper, the authors propose using an AI agent, which is a system consisting of a graph, function tools with control modules, and a large language model (LLM) that uses RAG. This approach makes it possible to automate routine tasks, facilitate the search for information about reservoirs, analyze the actual and historical state of reservoirs, and suggest possible operating modes for reservoirs based on various forecast data.
Keywords: reservoir management, artificial intelligence, AI agent, LLM, RAG.

Управление водохранилищами представляет собой итеративный процесс интегрированного принятия решений, касающихся использования и изменения водных ресурсов. Подготовка режимов работы водохранилищ, как правило, основывается на анализе результатов многовариантных расчетов, на основе которых осуществляется выбор наиболее приемлемого решения в условиях конкретной водохозяйственной обстановки. Современный подход к решению этой задачи включает в себя использование методов искусственного интеллекта. Существующие готовые нейросетевые модели направлены на решение типовых распространённых задач классификации, прогнозирования и генерации и не могут быть интегрированы напрямую в процесс управления водохранилищами, в связи с чем применительно к данной области требуется разработка собственных решений, а именно разработка интеллектуальной агентной системы.

Развитие больших языковых моделей (Large Language Models, LLM) создало предпосылки для разработки интеллектуальных агентных систем (ИИ-агентов, AI-agents), способных воспринимать пользовательские запросы, интерпретировать исходные данные, выбирать необходимые инструменты (как внутренние, так и внешние)

и формировать последовательность действий для достижения заданной цели с дальнейшей оценкой результатов выполненных действий. Это особенно значимо для управления водохранилищами, поскольку данный процесс включает в себя решение различных задач: определение типа половодья (экстремальное половодье и прочие половодья), поиск гидрологии для построения модельных гидрографов, построение модельных гидрографов, определение необходимости и объема предполоводной сработки, расчет режимов работы водохранилищ с использованием различных видов прогнозов в условиях наличия неполной информации с последующими уточнениями.

Работа ИИ-агента представляет собой замкнутую последовательность: $O_t \rightarrow S_t \rightarrow P_t \rightarrow A_t \rightarrow O_{t+1}$, где O_t – наблюдаемая ИИ-агентом информация в момент времени t, S_t – представление текущего состояния системы, P_t – сформированный план решения задачи, A_t – выполняемое действие, а O_{t+1} – новое наблюдение после выполнения всех операций.

Так, каждое предыдущее действие может влиять на дальнейшее состояние системы и последующие решения. Интеллектуальным ядром системы является LLM, а архитектура строится на дополнительных компонентах, обеспечивающих системе наличие долговременной и краткосрочной памяти, механизмов планирования, специализированных инструментов (сторонние сервисы, API, базы данных) и способности ИИ-агента непосредственно взаимодействовать с ней [1].

Интеллектуальная агентная система обладает определённой степенью автономности. ИИ-агенту задаётся целевая функция или задача, для достижения которой система определяет необходимые промежуточные шаги. В частности, в процессе управления водохранилищами при поступлении прогноза половодья перед ИИ-агентом стоит задача расчета режима предполоводной сработки и пропуска половодья. В рамках решения данной задачи ИИ-агент автономно осуществляет определение обеспеченности объема половодья, поиск гидрографов-аналогов, расчет модельных гидрографов, определение необходимости и объема предполоводной сработки, определение отдач в зонах диспетчерского графика и построение режима работы водохранилища на предполоводный период и период половодья.

Так, в зависимости от архитектуры ИИ-агент может выбирать используемые инструменты, декомпозировать сложную задачу на подзадачи, корректировать план при получении новой информации и учитывать результаты ранее выполненных действий. С точки зрения механизма принятия решений можно выделить следующие категории интеллектуальных агентов [2]:

1. Реактивные ИИ-агенты формируют действие преимущественно на основании текущего состояния среды. Их поведение может быть представлено следующей функцией: $A_t = \pi(O_t)$, где π представляет собой стратегию выбора действия. При изменении входной информации интеллектуальный агент повторно анализирует текущее состояние и формирует новое действие. Отличительными особенностями данной архитектуры являются простота, низкие требования к объему памяти и отсутствие задержек в принятии решений. К ее существенному ограничению относится отсутствие учета длинных последовательностей взаимосвязанных событий и сложные зависимости между объектами.

2. Планирующие ИИ-агенты - дополнение реактивного механизма способностью формировать последовательность промежуточных действий, необходимых для достижения целевого состояния. Такой интеллектуальный агент осуществляет не только отображение текущего состояния в действии, но и поиск возможной последовательности решений: $S_t \rightarrow \{A_t, A_{t+1}, \dots, A_{t+n}\}$. Данный подход позволяет учитывать потенциальные последствия каждого решения, но одновременно с этим эффективность планирования сильно коррелирует с полнотой модели окружающей среды, которой располагает ИИ-агент.

3. Рефлексивные ИИ-агенты, в свою очередь, после выполнения действий дают оценку полученному результату, выявляют ошибки и отклонения, а также корректируют стратегию своего поведения. Указанный механизм особенно значим для задач, характеризующихся неполнотой информации и сильно изменяющимися условиями функционирования.

4. Инструментальные ИИ-агенты способны взаимодействовать не только со встроенной базой знаний, но и с внешними программными средствами, базами данных, вычислительными моделями, специализированными алгоритмами и API. В этом случае LLM является координатором, определяя, какой инструмент использовать и как интерпретировать полученный результат. Для задач управления техническими и природными системами данная архитектура представляет особый интерес, поскольку у ИИ-агента появляется возможность объединения аналитических моделей, прогнозных систем, баз данных и оптимизационных алгоритмов, которые лежат в основе управлением водохранилищами.

5. Многоагентные интеллектуальные системы - отдельное направление, в котором задача распределяется между несколькими специализированными интеллектуальными агентами. Каждому ИИ-агенту может быть назначена определенная роль, обладающая собственным набором инструментов и областью ответственности. В результате

формируется распределенная система принятия решений, в которой интеллектуальные агенты обмениваются информацией, совместно формируя итоговое решение.

Генезис архитектур интеллектуальных агентов происходит от простого реактивного поведения к более многозадачным системам, способным осуществлять планирование, использовать функциональные инструменты, учитывать контекст, взаимосвязи между объектами и долгосрочные последствия принимаемых решений. На практике современные архитектуры часто представляют собой комбинацию нескольких указанных механизмов.

Дополнительным компонентом агентной архитектуры является механизм Retrieval-Augmented Generation (RAG), обеспечивающий обращение ИИ-агента к внешним источникам знаний. Его применение позволяет отделить языковое рассуждение от хранения специализированной предметной информации и обеспечить получение актуального или контекстно-зависимого содержания, необходимого для решения конкретной задачи.

Знания, которыми располагает LLM, ограничены данными, использованными при ее обучении, и не обеспечивают гарантированного доступа к актуальной или специализированной информации предметной области в сфере водных ресурсов. Передача полного массива документов в контекст языковой модели является неэффективной вследствие ограничений размера контекстного окна, вычислительных затрат и отсутствия необходимости обрабатывать нерелевантную информацию. Однако для корректной работы ИИ-агенту необходим доступ к специализированной информации, которая не содержится непосредственно во входном запросе и не может быть надежно воспроизведена исключительно на основании параметров текущего состояния. К такой информации относятся как гидрологические словари с характерной данной области терминологией, так и правила использования водных ресурсов, включающие в себя информацию о технико-эксплуатационных характеристиках водохранилищ, гидротехнических сооружениях, диспетчерских графиках и прочей информации.

Архитектура ИИ-агента должна обеспечивать механизм обращения к внешним источникам знаний и включения найденной информации в текущий контекст принятия решения. Одним из подходов, позволяющих реализовать такую функциональность, является Retrieval-Augmented Generation (RAG). В отличие от автономной генерации при использовании RAG интеллектуальная модель получает возможность извлекать релевантные фрагменты из внешнего хранилища знаний и использовать их при формировании последующего вывода.

Retrieval-Augmented Generation объединяет два процесса: поиск релевантной информации и генерацию ответа. В отличие от обычного чат-бота, RAG-ассистент сначала обращается к базе знаний, выбирает наиболее подходящие фрагменты документов, а затем передает их языковой модели как контекст.

Выбор RAG в качестве основного метода обусловлен тем, что нормативная база управления водохранилищами подвергается периодическим изменениям и RAG позволяет работать с актуальными данными в реальном времени без необходимости переобучения модели при каждом изменении. Кроме того, RAG обеспечивает прозрачность ответов: всегда можно отследить, на основе какого документа был сгенерирован ответ.

Схема работы RAG-системы включает следующие этапы (рис. 1):



Рис. 1 – Схема работы RAG-системы[17]

Интеллектуальный ассистент на основе RAG состоит из следующих компонентов [3]:

1. Модуль загрузки данных отвечает за импорт документов из файлов и баз данных. На этом этапе важно сохранить метаданные: название документа, дату, раздел, номер страницы и другие признаки, которые могут быть полезны при отображении источников.

[17] Составлено авторами по материалам исследования

2. Модуль индексации преобразует текстовые фрагменты в числовые векторы с помощью модели эмбеддингов. Близкие по смыслу тексты получают близкие векторные представления, что позволяет выполнять семантический поиск.

3. Векторная база данных хранит эмбеддинги и обеспечивает быстрый поиск ближайших фрагментов. Для этой цели могут применяться FAISS, Chroma, Weaviate, Milvus, Qdrant и другие решения.

4. Модуль поиска принимает запрос пользователя, строит его векторное представление и находит фрагменты, наиболее близкие к запросам. Дополнительно может использоваться гибридный поиск, объединяющий семантическое сравнение и классический поиск по ключевым словам.

5. Модуль генерации формирует инструкцию для языковой модели. В промпт включаются вопрос пользователя, найденные фрагменты и правила ответа.

Так, механизм RAG обеспечивает ИИ-агенту доступ к внешним источникам предметной информации. Однако для управления водохранилищами требуется дополнительный механизм, обеспечивающий выбор и координацию специализированных операций: обработку пользовательских параметров, получение исходных данных, выполнение расчетов, проверку результатов и формирование итогового ответа. В данном исследовании реализация описанного функционала предложена авторами через графовую архитектура агентного процесса.

Графовый подход предполагает представление объектов, состояний и взаимосвязей между ними в форме графа для структурной организации процесса функционирования самого ИИ-агента [4]. В данном случае граф используется не как граф объектов управляемой гидротехнической системы, а как структурная модель самого процесса принятия и реализации решений. Вершины графа соответствуют функциональным операциям интеллектуального агента, включая маршрутизацию, обработку входных параметров, получение данных и выполнение специализированных расчетов, а связи между вершинами определяют возможные последовательности выполнения этих операций. Подобный подход позволяет совместить адаптивность интеллектуального агента с заданной структурой вычислительного процесса.

Формально подобный граф может быть представлен в виде: $G = (V, E)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ — множество функциональных узлов, а $E \subseteq V \times V$ — множество направленных связей, определяющих возможные переходы между ними.

В рассматриваемой архитектуре вершина является операционным элементом агентного процесса. В частности, в составе графа интеллектуального агента для управления водными ресурсами могут присутствовать следующие типы узлов:

- маршрутизирующие узлы, определяющие дальнейшее направление выполнения в зависимости от текущего состояния задачи и полученных данных;

- вычислительные узлы, реализующие специализированные математические расчеты;

- узлы получения и выгрузки данных, обеспечивающие взаимодействие с внешними базами данных, информационными системами и другими источниками данных;

- узлы предварительной обработки, преобразующие пользовательский запрос и поступившие параметры в формализованный набор данных, пригодный для дальнейшей обработки;

- промежуточные узлы, выполняющие преобразование, агрегацию или структурирование результатов предыдущих этапов перед передачей их следующим компонентам;

- узлы формирования результата, обеспечивающие подготовку итоговой информации для пользователя или последующей системы управления.

В отличие от обычного последовательного рабочего потока, где порядок операций заранее фиксирован, графовая архитектура допускает несколько возможных сценариев выполнения одной задачи. Пусть v_i - текущий узел графа, а s_i - состояние задачи после выполнения соответствующей операции. Тогда маршрутизатор реализует отображение: $R(s_i) \to v_j$, где R - функция маршрутизации, а v_j - следующий узел, выбранный в соответствии с текущим состоянием задачи. Так, одна и та же исходная задача может проходить через различные последовательности узлов в зависимости от содержащихся в ней параметров, результатов промежуточных вычислений и полученной из внешних источников информации.

Такое представление принципиально отличается от линейной последовательности действий. ИИ-агент не обязан выполнять доступные ему функции в фиксированном порядке. Вместо этого структура графа задает пространство допустимых действий, а маршрутизирующие узлы определяют конкретную траекторию выполнения. В общем случае путь выполнения можно представить как: $P(x) = \{v_1, v_2, \dots v_k\}$, где x — исходный пользовательский запрос, а $P(x)$ — выбранный для него путь в графе.

Первоначальная задача интеллектуальной агентной системы заключается в преобразовании естественно-языкового запроса в формализованный набор параметров, который в дальнейшем способна обработать техническая система. Этот процесс может быть представлен следующим образом: $Q \to V_{route} \to V_{parse} \to V_{normalize}$, где Q – пользовательский запрос, V_{route} – маршрутизатор, определяющий дальнейший путь выполнения графа, V_{parse} – узел выделения параметров, $V_{normalize}$ – узел нормализации и структурирования параметров для дальнейшей работы.

После определения требуемого сценария ИИ-агент может инициировать получение дополнительных данных как из внешних баз данных, так и от самого пользователя. В зависимости от сформулированной задачи требуется различная информация. Примерами подобных задач могут выступать:

1. Получение информации о прогнозных данных (рис. 2).

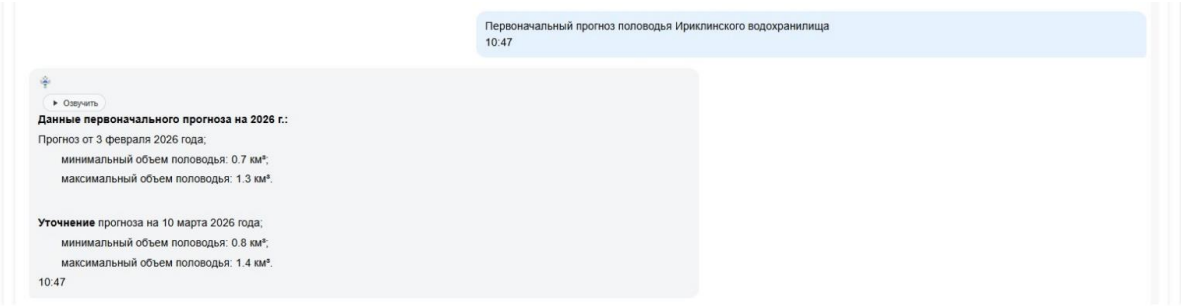


Рис. 2 – Пример предоставления ИИ-агентом актуальных данных о первоначальном прогнозе половодья Ириклинского водохранилища[18]

2. Анализ ретроспективных данных (рис. 3).

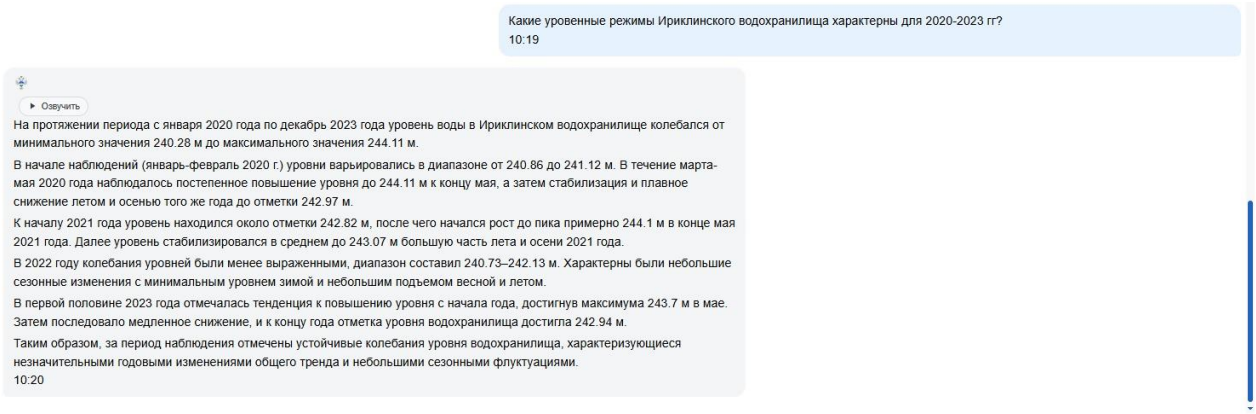


Рис. 3 – Пример предоставления ИИ-агентом аналитической сводки по ретроспективным уровенным режимам Ириклинского водохранилища[19]

3. Корректировка режима работы водохранилища на основе первоначального прогноза при поступлении уточняющего прогноза, для которой потребуются результаты предыдущих вычислений. Тогда ИИ-агент определит, какой объем водохранилища соответствовал режиму работы водохранилища, определенному на основе первоначального прогноза, затем обратится к данным уточняющего прогноза и проведет пошаговую процедуру расчета режима работы водохранилища (рис. 4-5).

[18] Составлено авторами по материалам исследования
[19] Составлено авторами по материалам исследования

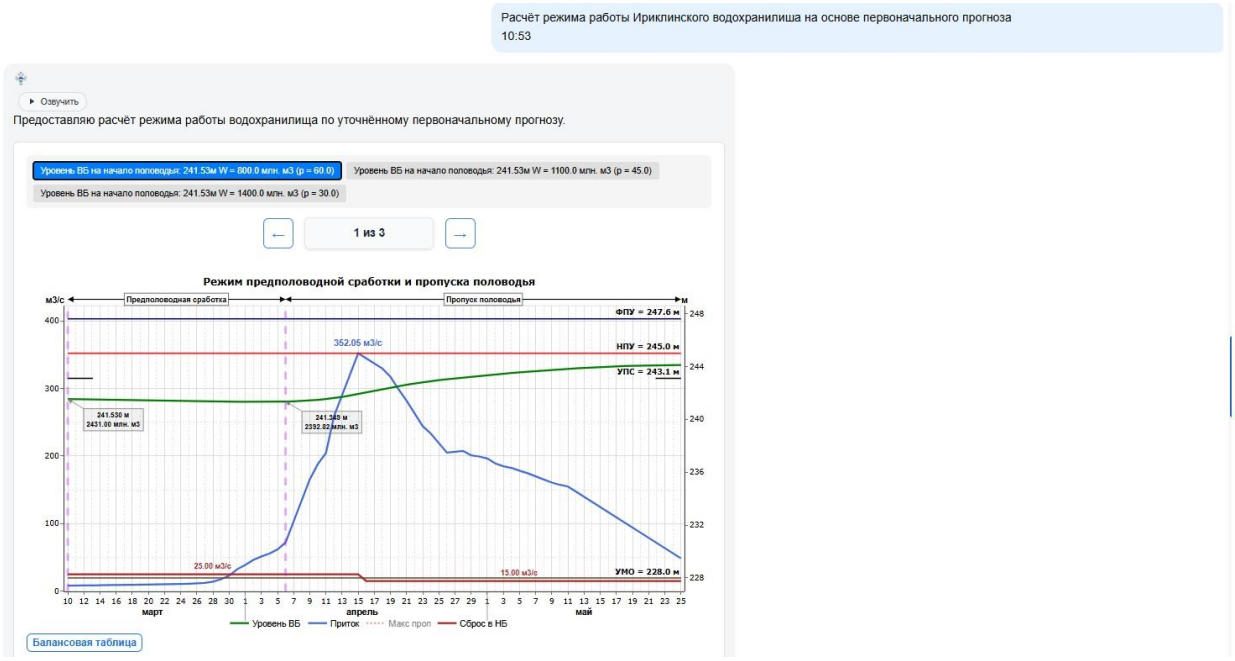


Рис. 4 – Пример расчета ИИ-агентом режима работы Ириклинского водохранилища на основе данных первоначального прогноза[20]

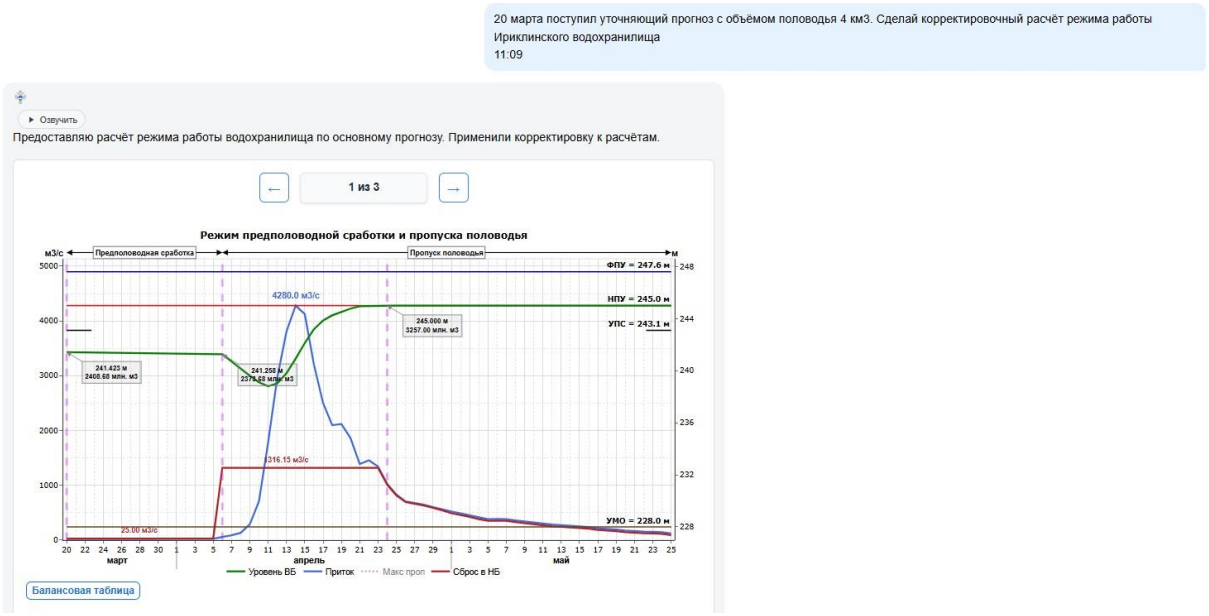


Рис. 5 – Пример корректирующего расчета ИИ-агентом режима работы Ириклинского водохранилища на основе данных первоначального прогноза[21]

4. Оценка актуального фактического режима работы водохранилища (рис 6.).

[20] Составлено авторами по материалам исследования
[21] Составлено авторами по материалам исследования

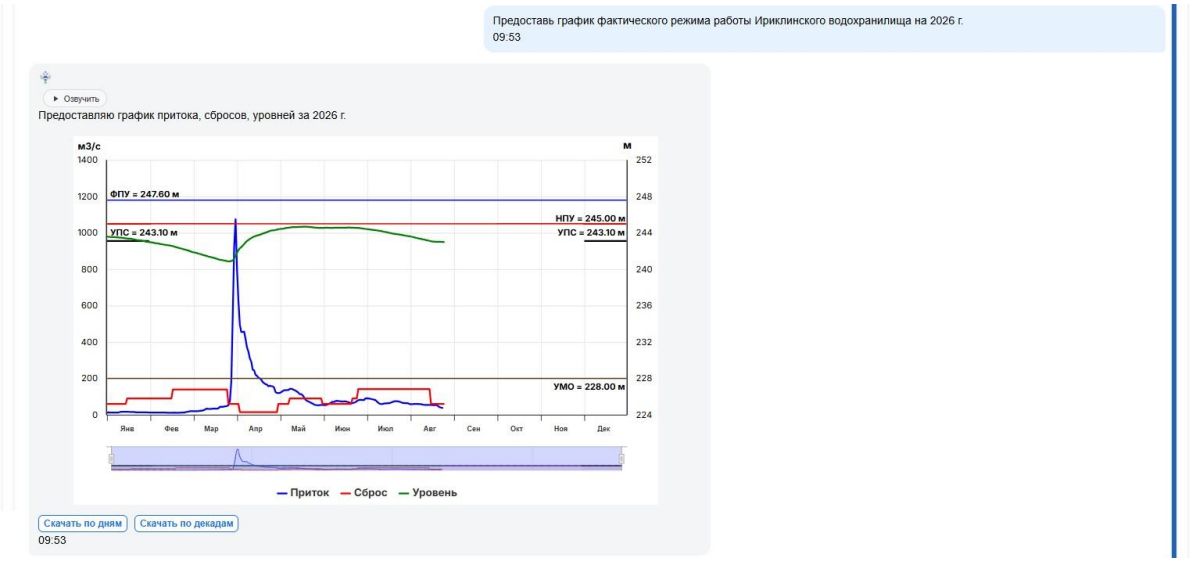


Рис. 6 – Пример предоставления ИИ-агентом актуальных данных о притоке, сбросе и уровне Ириклинского водохранилища[22]

Таким образом, граф фактически выступает в качестве структурного механизма управления поведением ИИ-агента. Интеллектуальная модель определяет, какие действия необходимо выполнить или какую ветвь следует выбрать, тогда как граф задает пространство допустимых последовательностей операций, а процесс принятия ИИ-агентом становится более точным и структурированным. А сочетание интеллектуального агента, графовой организации процесса, специализированных расчетных функций и механизма RAG представляет собой перспективный подход к автоматизации отдельных этапов управления водохранилищами. Целесообразность такого подхода определяется необходимостью одновременно учитывать специфику пользовательского запроса, доступные данные, последовательность расчетных процедур и результаты промежуточных операций.

Список литературы

1. Qu X., Damoah A., Sherwood J. [et al.] A Comprehensive Review of AI Agents: Transforming Possibilities in Technology and Beyond // arXiv preprint. – 2025. — URL: https://arxiv.org/html/2508.11957v1

2. Xu B. AI Agent Systems: Architectures, Application, and Evaluation // arXiv preprint. – 2026. – URL: https://arxiv.org/abs/2601.01743

3. Gao Y., Xiong Y., Gao X. [et al.] Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey // arXiv preprint. – 2024. – URL: https://arxiv.org/abs/2312.10997

4. Bei Y., Zhang W., Wang S. [et al.] Graphs Meet AI Agents: Taxonomy, Progress, and Future Opportunities // arXiv preprint. – 2025. – URL: https://arxiv.org/abs/2506.18019

[22] Составлено авторами по материалам исследования

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНСАМБЛЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ДЕШИФРИРОВАНИИ КОСМОСНИМКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБВОДНЕННОСТИ ТЕРРИТОРИЙ

Бут К.С.
Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ФГБУ РосНИИВХ), г. Ростов-на-Дону
E-mail: bootkris@mail.ru

Аннотация: Определение обводненности территорий возможно не только ручными методами, но и путем использования нейронных сетей. В данной работе используется ансамбль нейросетевых моделей, состоящий из нейронной сети по поиску облаков и теней от них и нейронной сети по определению воды на данных дистанционного зондирования земли. Данный подход позволяет комплексно проанализировать космоснимки, верно определив водную поверхность, снизив долю ложного обнаружения. На его основе построена система автоматического мониторинга обводненности территорий.

Ключевые слова: нейронная сеть, дистанционное зондирование, сегментация водной поверхности, Landsat, маска облаков.

USING AN ENSEMBLE OF NEURAL NETWORK MODELS FOR SATELLITE IMAGE INTERPRETATION TO DETERMINE TERRITORIAL WATER COVERAGE

But K.S.
Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-on-Don
E-mail: bootkris@mail.ru

Abstract: Determining territorial water coverage is possible not only through manual methods but also by using neural networks. This work employs an ensemble of neural network models consisting of a network for detecting clouds and their shadows and a network for identifying water from Earth remote sensing data. This approach enables comprehensive analysis of satellite imagery, correctly identifying water surfaces while reducing the rate of false detections. On its basis, an automated system for monitoring territorial water coverage has been built.

Keywords: neural network, remote sensing, water surface segmentation, Landsat, cloud mask.

Введение

Точная оценка площади и динамики изменения водной поверхности достигается путем анализа космических снимков.

Традиционные методы обнаружения воды на спутниковых изображениях основаны на использовании спектральных индексов и пороговых правил [1]. Однако они использовались только на ранних этапах развития методов автоматического анализа, имеют ряд ограничений, в том числе низкую устойчивость в условиях сложного фона, облачности, застроенных территорий и т. п. [2].

В отличие от индексных методов нейронные сети позволяют извлекать признаки из данных и учитывать как локальные особенности пикселей, так и контекст их окружения. Достоверный анализ включает в себя не только задачу классификации, но и попиксельное определение воды/суши, учет ненаблюдаемой/недоступной территории, верный подсчет площади.

Под ансамблем нейросетевых моделей в данной работе подразумевается совместное использование специализированных моделей, результаты которых объединяются логической операцией.

Постановка задачи

Ручное дешифрирование, использование индексных методов просты и часто вычислительно эффективны, но на результат оказывают влияние неисправимые в этих рамках проблемы. Свойства воды, мутность, облачность на снимках, тени, другие атмосферные условия ограничивают стабильность ручных и индексных подходов.

Необходимо разработать метод, учитывающий одновременно спектрально-пространственные признаки водных объектов на космоснимках и доступную видимую территорию, пригодную для количественного анализа.

Выбор спутниковых снимков

Спутники Landsat 8-9 имеют лучшие характеристики в сравнении с предыдущими миссиями 1-7. Среди них улучшенные сенсоры (OLI (Operational Land Imager)), делающие снимки качественнее, повышенная частота съемки (спутники 8 и 9 работают в паре). Перечисленные факторы делают снимки более подходящими для задач обнаружения водных объектов. Для получения снимков Landsat 8-9 Level 1 в рамках исследования выбран источник Earth Explorer [3]. Данные Landsat 8-9 включают 11 спектральных каналов, каждый из которых чувствителен к различным диапазонам электромагнитного спектра, что позволяет использовать снимки для детального анализа. Помимо этого, данные Landsat обновляются ежедневно, захватывают всю территорию обследования (Волго-Ахтубинская пойма).

Все исследование проводилась на снимках Landsat 8-9 территории Волго-Ахтубинской поймы, использовались каналы B2 — B7.

Определение облаков на снимках

Для части снимков Волго-Ахтубинской поймы сделаны ручные маски «чистой» территории. Под такой территорией подразумевается области без облаков и теней.

При любом способе определения воды нельзя полностью исключить ошибку выделения облака как водного объекта (из-за их спектральной близости). По этой причине перед результативным подсчетом обводненности территории со снимков вырезаются полностью облака.

Для минимизации пропуска важных территорий, человеческого фактора и различных ошибок целесообразно использовать нейросетевые модели. Задачу удаления облачных, труднораспознаваемых частей снимка решает нейронная сеть OmniCloudMask [4]. Модель заявлена как «сенсорно-независимая», т.е. будучи обученной только на снимках Sentinel-2, она без дополнительного дообучения работает на данных Landsat,

PlanetScope и Maxar. основе OmniCloudMask лежит ансамбль из двух независимо обученных сверточных нейронных сетей архитектуры U-Net (рис. 1).

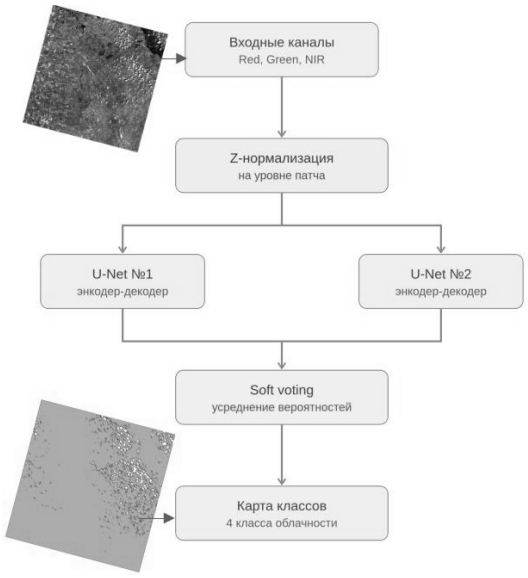


Рис. 1 — Архитектура модели OmniCloudMask

Средняя точность данной модели на снимках Landsat 8/9 для определения классов «плотное облако» и «тонкое облако» составила 91,5%.

На выходе модель формирует растровую карту классов той же размерности, что и входное изображение, где каждому пикселю присвоен один из четырёх классов:

0 — Clear («чистая» территория, свободная от облаков и теней);

1 — Thick Cloud (плотное, непрозрачное облако);

2 — Thin Cloud (тонкое, полупрозрачное облако / дымка);

3 — Cloud Shadow (тень, отбрасываемая облаком).

В данном исследовании со снимков вырезались области 1, 2, 3 класса как трудно-анализируемые облачные части. Визуальное сопоставление ручной и нейросетевой масок показано на рисунках 2 и 3.

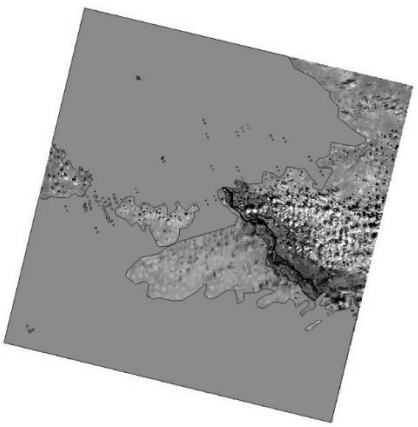


Рис. 2 — Ручная маска безоблачной территории снимка LC08_L1TP_170027_20190911_20200826_02_T1

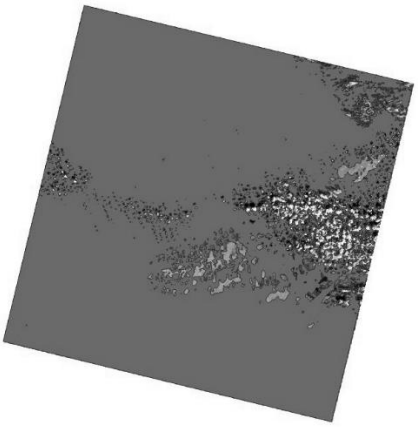


Рис. 3 — Бинарная маска безоблачной территории снимка LC08_L1TP_170027_20190911_20200826_02_T1 от модели OmniCloudMask

Для большинства снимков нейронный подход позволил учитывать больше безоблачной территории для анализа.

Количественное сравнение площади «чистой» территории приведено в таблице 1.

Таблица 1 — Анализ безоблачной территории на примере снимка LC08_L1TP_170027_20190911_20200826_02_T1

Показатель	Площадь, га
Площадь «чистой» территории по ручной маске	2 636 697.34
Площадь «чистой» территории по OmniCloudMask	3 372 464.16

Для рассматриваемой сцены нейросетевая модель OmniCloudMask сохранила для анализа на 735 тыс. га больше безоблачной территории. Значит, применение нейронных сетей позволяет уменьшить избыточное исключение участков при дешифрировании обводненной территории и сохранить большую площадь (на 27% на примере снимка LC08_L1TP_170027_20190911_20200826_02_T1).

Определение водных объектов

Дешифрирование космоснимков проводилось с использованием нескольких подходов: традиционная ручная разметка, индексные методы и нейросетевые модели.

В программе QGIS с помощью подложки карт сделаны ручные маски разметки воды на снимках (рис. 4).

К классическим автоматизированным подходам относится применение спектральных индексов. Для выделения воды рассчитан нормализованный разностный водный индекс:

$$NDWI = \frac{B3-B5}{B3+B5},$$

где B3 (Green) — значение зелёного канала, B5 (NIR) — значение ближнего инфракрасного канала. Данный индекс повышает контраст водных объектов по отношению к суше (рис. 5).

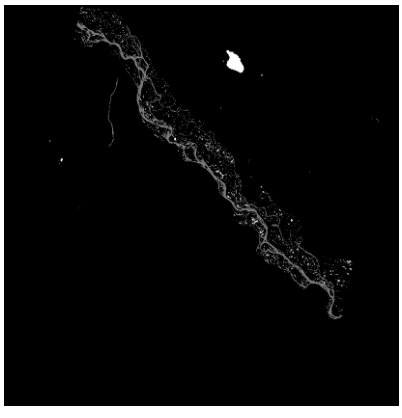


Рис. 4 — Определение воды на снимке LC08_L1TP_170027_20220530_20220603_02_T1 ручным методом



Рис. 5 — Определение воды на снимке LC08_L1TP_170027_20220530_20220603_02_T1 индексом NDWI

Для повышения устойчивости в условиях застройки и сложного фона предложен [2] модифицированный индекс MNDWI:

$$MNDWI = \frac{B3-B6}{B3+B6},$$

где B6 (SWIR) — коротковолновый инфракрасный канал. Замена NIR на SWIR позволяет лучше подавлять отклик от застроенных территорий и части фоновых объектов (рис. 6).

Стоит отметить, что MNDWI очевидно больше воды выделил по сравнению с более классическим NDWI. Однако эта вода ложная, многих выделенных объектов нет в ручной маске.

Несмотря на широкую распространённость, индексные методы имеют ряд ограничений:

1) основаны на фиксированной аналитической формуле и не способны адаптироваться к сложным нелинейным закономерностям;

2) необходим подбор порогов для конкретных условий съёмки;

3) не учитывают форму объектов и пространственное окружение пикселей.

В результате в сложных сценах, содержащих тени, заболоченные участки, влажные почвы или смешанные пиксели на береговых границах, качество выделения воды может существенно снижаться.

Для улучшения качества и скорости обработки снимков выбрана нейронная сеть DeepWaterMap [4]. Авторами указано, что точность (методом precision) на снимках Landsat составила 0,91.

С помощью модели (набор весов cp.135.ckpt) формируется вероятностная карта воды. Каждому пикселю снимка присваивается вероятность: вода или суша в этой области. Для анализа результат бинаризируется с порогом 60%. В результате получаем метки классов: 0 — ничего, 1 — вода). Заметно, что воды выделено визуально больше (рис. 7), чем при ручной разметке.



Рис. 6 — Определение воды на снимке LC08_L1TP_170027_20220530_20220603_02_T1 индексом MNDWI

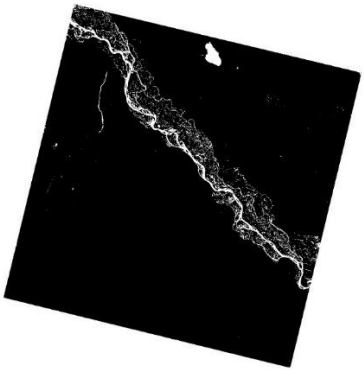


Рис 7 — Определение воды на снимке LC08_L1TP_170027_20220530_20220603_02_T1 с помощью модели DeepWaterMap с порогом 60%

Далее представлена карта ошибок DeepWaterMap для визуальной оценки качества нейронной модели. Для анализа пространственного распределения ошибок вычислены истинно положительные, ложно положительные и ложно отрицательные пиксели (рис. 8).

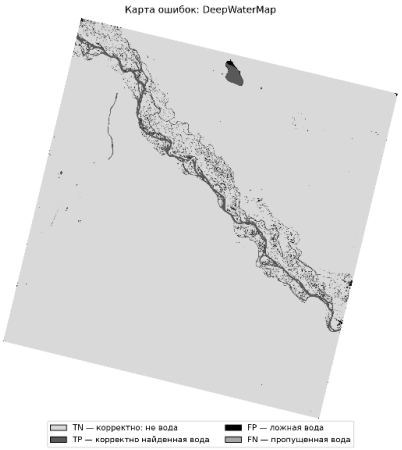


Рис. 8 — Карта ошибок на снимке LC08_L1TP_170027_20220530_20220603_02_T1 модели DeepWaterMap с порогом 60%

Количественные результаты определения воды на тестовом снимке LC08_L1TP_170027_20220530_20220603_02_T1 приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Сравнение методов определения воды на примере снимка LC08_L1TP_170027_20220530_20220603_02_T1

Метод	Площадь воды, га	Разница с ручной маской, га
Ручная маска	97463.97	0.0
DeepWaterMap	113423.71	15959.74
NDWI	81034.8	-16249.17
MNDWI	118887.3	21423.33

Согласно посчитанным площадям, использование DeepWaterMap наиболее рационально для снимков Landsat. При использовании NDWI будут потери информации (более 16 тыс. Га), а при MNDWI, наоборот, лишняя ложная вода.

Мониторинг обводненности территорий

На основе вышеописанного нейросетевого ансамбля реализована локальная система мониторинга обводненности территорий. На рис. 9 представлено схема функционала системы.

Система выполняет поиск снимков за выбранный период, объединяет маски воды и наблюдаемой территории, пересекает их с заданными векторными объектами и рассчитывает площадь воды, процент обводнения и долю покрытия космическим снимком. Пример результатов приведен в таблице 3, а итоговая водная геометрия (шейп-файл) в системе доступна сразу к просмотру (рис. 10).

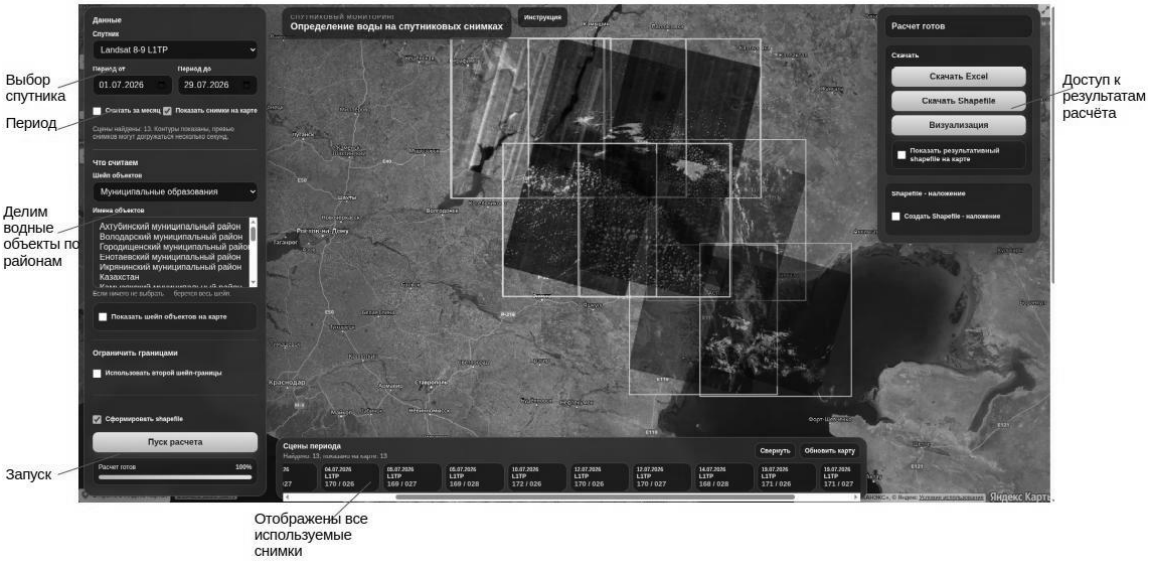


Рис. 9 — Локальная система мониторинга обводненности территории Волго-Ахтубинской поймы

Таблица 3 — Пример результатов расчётов мониторинга на 02.07.2026 по некоторым районам на территории Волго-Ахтубинской поймы

Дата	Название объекта	Площадь обводненной территории на дату, га	Площадь объекта, га	Процент обводнения, %	Доля покрытия космоснимком, %	Снимок
02.07.2026	Городищенский муниципальный район	61,1	19488,52	0,31	100	LC09_L1TP_172026_20260702_20260702
02.07.2026	Ленинский муниципальный район	4740,29	152161,4	3,12	62,13	LC09_L1TP_172026_20260702_20260702
02.07.2026	Светлоярский муниципальный район	6458,08	47576,21	13,57	100	LC09_L1TP_172026_20260702_20260702
02.07.2026	Среднеахтубинский муниципальный район	9630,56	100377,05	9,59	100	LC09_L1TP_172026_20260702_20260702
02.07.2026	Черноярский муниципальный район	1500,9	361937,06	0,41	9,89	LC09_L1TP_172026_20260702_20260702
02.07.2026	городской округ город Волжский	1323,04	12727,13	10,4	100	LC09_L1TP_172026_20260702_20260702
02.07.2026	городской округ город-герой Волгоград	6941,67	53827,2	12,9	100	LC09_L1TP_172026_20260702_20260702



Рис. 10 — Наложение на карту результативного шейп-файла с водными объектами, найденными с помощью ансамбля нейросетевых моделей OmniCloudMask и DeepWaterMap

Заключение

Предложенный ансамбль нейросетевых моделей объединяет определение доступной безоблачной территории и сегментацию водных объектов. Использование OmniCloudMask позволило сохранить для анализа 27.9% больше территории тестового снимка по сравнению с ручной обработкой, а применение DeepWaterMap на тестовой сцене показало наименьшее отклонение площади воды от эталонной ручной маски.

Дальнейшая оценка метода предполагает тестировании на других территориях, анализ устойчивости результатов для различных съемок.

Список литературы

1. McFeeters S. K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features // International Journal of Remote Sensing - 1996

2. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery // International Journal of Remote Sensing -2006 - Vol. 2 - no. 14. P. 3025–3033.

3. U.S. Geological Survey. USGS EarthExplorer [Электронный ресурс]. — URL: https://earthexplorer.usgs.gov/

4. Isikdogan L. F., Bovik A. C., Passalacqua P. DeepWaterMap: a deep model that segments water on multispectral images; репозиторий проекта. URL: https://github.com/isikdogan/deepwatermap

5. Wright N., Duncan J. M. A., Callow J. N., Thompson S. E., George R. J. Training Sensor-Agnostic Deep Learning Models for Remote Sensing: Achieving State-of-the-Art Cloud and Cloud Shadow Identification with OmniCloudMask // Remote Sensing of Environment. – 2025 - Vol. 322. - Article 114694

ТЕХНОГЕННАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ РЕЧНЫХ СИСТЕМ ВОСТОЧНОГО ПРИАЗОВЬЯ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ И ПУТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Ерёмина Д.С.
Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону
E-mail: dianeryomina@yandex.ru

Аннотация. В работе проанализированы масштабы антропогенной трансформации речных систем на востоке Приазовья – территории с высокой природной уязвимостью и интенсивным хозяйственным освоением. С применением данных дистанционного зондирования и натурных обследований установлено, что в бассейнах рек Бейсуг, Челбас, Албаши, Ясени, Ея и Чубурка (суммарная водосборная площадь >25 тыс. км²) функционирует порядка 3 тыс. водоподпорных сооружений, что обусловило сокращение общей длины водотоков на 17,4 % и их распад на изолированные водоёмы. Фрагментация русел усиливает засоление (в реках Ея и Чумбурка концентрация солей достигает 10–13 г/л), эвтрофикацию и обеднение экосистем. Длительное маловодье (более 18 лет) и снижение стока весеннего половодья выступают катализатором этих процессов, формируя синергию техногенных и климатических факторов деградации рек Восточного Приазовья. Обоснован переход от разрозненных мероприятий к бассейновой экосистемной стратегии, предусматривающей полную инвентаризацию сооружений, экологическую реабилитацию русел и учёт климатических прогнозов при долгосрочном планировании.

Ключевые слова: Восточное Приазовье, руслоперегораживающие сооружения, климатические изменения, устойчивое развитие, экосистемный подход.

TECHNOGENIC FRAGMENTATION OF RIVER SYSTEMS IN THE EASTERN AZOV REGION: ECOLOGICAL CONSEQUENCES AND WAYS OF RESTORATION UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

Eremina D.S.
Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don
E-mail: dianeryomina@yandex.ru

Annotation. The study analyzes the scale of anthropogenic transformation of river systems in the eastern part of the Azov region – an area characterized by high natural vulnerability and intensive economic development. Using data from remote sensing and field surveys, it was established that in the basins of the Beysug, Chelbas, Albashi, Yaseni, Eya, and Chuburka rivers (with a total catchment area of >25,000 km²), approximately 3,000 water-retaining structures are in operation, which has led to a 17.4 % reduction in the total length of watercourses and their fragmentation into isolated water bodies. The fragmentation of river channels exacerbates salinization (in the Eya and Chumburka rivers, the salt concentration reaches 10–13 g/l), eutrophication, and the impoverishment of ecosystems. Prolonged low water levels (more than 18 years) and a decrease in spring flood runoff act as a catalyst for these processes, creating a synergy of anthropogenic and climatic factors contributing to the degradation of rivers in the Eastern Azov region. The transition from isolated measures to a basin-based ecosystem strategy is substantiated; this strategy предусматривает a complete inventory of structures, ecological rehabilitation of riverbeds, and consideration of climate forecasts in long-term planning.

Keywords: Eastern Azov region, channel-blocking structures, climate change, sustainable development, ecosystem approach.

Введение

Гидрологическая и геоморфологическая значимость средних и малых водотоков Восточного Приазовья до настоящего времени остаётся недостаточно изученной, несмотря на высокую уязвимость данных экосистем и их интенсивную техногенную трансформацию. В числе ведущих факторов деформации степных рек юга России — повсеместная зарегулированность стока, обусловленная строительством плотин, дамб и иных подпорных сооружений. Несмотря на важность Восточно-Приазовской гидрографической области для водохозяйственного обеспечения южных регионов Российской Федерации, количество научных работ, посвящённых количественной оценке техногенной фрагментации её речных систем, в настоящее время остаётся ограниченным [1].

В настоящей работе рассматриваются бассейны рек – Бейсуг, Челбас, Албаши, Ясени, Ея и Чубурка – общая площадь которых превышает 25 тыс. км², а исходная протяжённость водотоков составляет около 9,5 тыс. км [1]. С середины XX века здесь неуклонно нарастает техногенное переустройство речной сети: нарушается естественный дренаж, массово возводятся дамбы, плотины, распахиваются и перепланируются водосборы. Всё это закономерно ведёт к утрате реками их ресурсного потенциала.

Цель работы – количественно оценить последствия техногенной фрагментации речных систем на примере характерных водотоков Восточного Приазовья и предложить стратегические подходы к их восстановлению с учётом современных климатических изменений.

Материалы и методы

Информационной базой послужили результаты, опубликованные Погореловым и др. [1, 2]. Они основаны на материалах воздушного лазерного сканирования, выполненного в июле–августе 2019 года на площади 1333 км² с плотностью отражений 15–20 точек на 1 м². Полученные данные позволили построить цифровую модель рельефа с разрешением 1 м.

Для картирования водосборов и эрозионной сети использовались ГИС-инструменты пространственного анализа. Местоположение перегораживающих сооружений уточнялось по космическим снимкам и выборочно верифицировалось в ходе полевых выездов 2018–2024 гг. [1, 2]. Оценка фрагментации русел выполнялась по продольным профилям и векторизованным контурам русловых водоёмов [2].

Результаты и обсуждение

Количественные параметры техногенной фрагментации

В пределах исследованных водосборов зафиксировано около 3 тыс. перегораживающих сооружений – их средняя плотность составляет 0,13 ед. на 1 км² [1]. Эти объекты коренным образом меняют гидрографическую сеть: уменьшается общая длина водотоков, снижается густота эрозионного расчленения, трансформируется структура землепользования. Сводные данные по бассейнам приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные гидрографические характеристики исследуемых речных бассейнов (составлено по данным [1, 2])

Речной бассейн	Площадь водосбора, км²	Длина водотоков, км	Количество перегораживающих сооружений в бассейне	Сокращение длины водотоков с 1999 по 2020/21 гг., км
Бейсуг	5 994.60	2252.5	400	469.4
Челбас	5 057.05	1868.27	нет данных	346.95
Кирпили	2650.00	1830	330	394.7
Албаши	1 210.65	340.09	нет данных	90.02
Ясени	1 033.60	173.69	нет данных	85.13
Ея	8 654.18	2674.65	590	551.87
М.Чубурка	1 077.53	347.08	нет данных	74.92
Итого	**25677.61**	**9486.28**	**~ 3 000**	**2012.9**

Особенно наглядно процесс фрагментации прослеживается на реке Кирпили: на отдельно исследуемом участке длиной 217 км обнаружено 82 подпорных сооружения [2]. Продольные профили таких рек приобретают ступенчатый облик – между плотинами формируются обособленные пруды и плёсы, которые используются для орошения, рыборазведения и местного водоснабжения, но при этом разрывают единую речную систему.

Общая потеря длины водотоков за период 1999–2020/21 гг. достигла 2012,9 км (17,4 % от исходной). Наиболее отчётливо деградация гидрографической сети Восточного Приазовья проявляется в верховьях русел рек и в балочной системе, для которых на современном этапе характерны пересыхание и заиливание [1]. Таким образом прослеживается устойчивый процесс водохозяйственной деградации.

Расчленение русел на изолированные фрагменты ведёт к деформации всего комплекса русловых процессов: снижается морфодинамическая активность потоков, реки фактически превращаются в цепочки пойменных водоёмов, что отражает переход к вторичной организации экосистем [2].

Экологические последствия: засоление и эвтрофикация

Помимо морфологических изменений, фрагментация провоцирует серьёзные гидрохимические сдвиги. В результате замедления водообмена и роста испарения в прудах-отстойниках накапливаются соли и биогенные элементы. Слой донных

отложений в степных реках достигает 1,5–7 м, что способствует эвтрофированию и ухудшению качества воды [1].

Критическая ситуация сложилась с минерализацией. Для водотоков Восточного Приазовья характерна изначально повышенная солёность, но в современных условиях она многократно возросла (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнительная характеристика минерализации рек Восточного Приазовья (составлено по данным [3,4])

Река	Минерализация, г/л	Класс вод по степени солёности
Понура	< 1	пресные
Кирпили	< 1	пресные
Челбас	2–8	слабосолоноватые
Бейсуг	2–8	слабосолоноватые
Ея	10–13	солоноватые (на уровне Азовского моря)
М. Чумбурка	10–13	солоноватые (на уровне Азовского моря)

В реках Ея и Мокрая Чумбурка содержание солей достигает 10–13 г/л – это сопоставимо с водой Азовского моря [3, 4]. Как подчёркивают специалисты ЮНЦ РАН, засоление – естественная черта данного аридного региона, однако ранее весенние паводки «промывали» русла, снижая концентрацию. Теперь же, в условиях многолетней маловодности, распреснение практически не происходит, и современные показатели минерализации значительно превышают исторические [3]. Согласно СанПиН, такая вода непригодна для питьевых целей, рыборазведения и орошения без предварительной подготовки [4]. В перспективе потребуется внедрение дорогостоящих технологий очистки.

Роль климатических изменений в деградации водотоков

С 2000-х годов на юге европейской части России устойчиво фиксируется маловодный период, связанный с сокращением стока [5]. По оценкам учёных Южного научного центра РАН, нынешний маловодный цикл длится уже более 18 лет и характеризуется наибольшей продолжительностью за всю историю инструментальных наблюдений [6]. Основные причины – тёплые малоснежные зимы и дефицит весенне-осенних осадков, влаги в почве практически нет. Вследствие этого многие малые реки Приазовья в межень превращаются в сеть изолированных друг от друга водоёмов, а на отдельных участках – полностью пересыхают (рис.). [7].

Основной причиной роста засоления называют сочетание природных факторов (усиливающихся климатических изменений – в том числе засухи и снижения водности рек) и техногенной фрагментации (зарегулирования) [3, 4]. В последние годы практически прекратилось весеннее половодье, которое ранее «обновляло» водоёмы и снижало концентрацию солей [8], а в маловодные годы потери на испарение из прудов,

образованных многочисленными руслоперегораживающими сооружениями, превышают 50% от полной емкости [7].



Рис. – Русло реки Ея в районе села Елизаветовка, 2020 г. [7]

Таким образом, наблюдается ярко выраженный синергетический эффект: антропогенные (зарегулированность стока) и климатические (засуха) факторы действуют в одном направлении, ускоряя деградацию экосистем и снижая их адаптационный потенциал [2].

Направления восстановительных мероприятий

Современное состояние рек Восточного Приазовья требует не точечных, а системных вмешательств. В первую очередь необходима полная инвентаризация всех перегораживающих сооружений, их технического состояния и влияния на водный режим. В Краснодарском крае такая работа проводится в 22 муниципалитетах, что позволяет региону войти в Федеральную программу экологического оздоровления водных объектов на 2025–2030 гг. [9].

Важнейшим элементом реабилитации является расчистка русел от наносов и завалов. Суммарная протяжённость участков, подлежащих расчистке, превышает 700 км [9]. В 2025 г. начаты работы на реке Челбас (Каневской район) [10], в 2026 г. – на реке 1-я Кочеты, всего на 2026 год запланирована расчистка 25 участков в Абинском и других районах. Для этого за последние три года приобретено более 50 единиц спецтехники (земснаряды, экскаваторы, бульдозеры) на сумму 650 млн руб. [9].

На стратегическом уровне принята «Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года» [11], которая ориентирована на восстановление биоресурсного потенциала Азовского бассейна, улучшение качества вод и снижение антропогенной нагрузки. Среди целевых показателей – сокращение сбросов загрязнённых сточных вод на 70 %, создание системы экологического мониторинга, расчистка береговых зон [12].

Переход к экосистемному управлению водными ресурсами подразумевает использование бассейнового принципа как основной единицы планирования [1]. Это позволит увязать меры по ликвидации последствий фрагментации с долгосрочными климатическими сценариями и восстановлением гидрологической целостности речных систем.

Заключение

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Техногенная фрагментация речной сети Восточного Приазовья достигла угрожающих масштабов: около 3 тыс. подпорных сооружений, потеря 17,4 % длины водотоков, превращение большинства рек в цепочки изолированных водоёмов [1, 2]. Это привело к изменениям русловых процессов и формированию вторичных экосистем.

2. Экологические последствия включают интенсивное засоление (вплоть до уровня морской воды), накопление донных отложений, эвтрофикацию и потерю ресурсной ценности водных объектов [3, 4]. Вода становится непригодной для хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного использования без специальной обработки.

3. Затяжной маловодный период (более 18 лет) и исчезновение весеннего половодья действуют как катализатор, значительно усугубляя эффекты зарегулирования стока. Это требует учёта климатической составляющей во всех восстановительных программах [6–8].

4. Выход из сложившейся ситуации лежит в экосистемном подходе к решению проблемы: инвентаризация сооружений, развитие сети мониторинга, масштабная расчистка русел (более 700 км) и реализация бассейновых экосистемных подходов, заложенных в Стратегию-2040 [9, 11, 12]. Только комплексное сочетание этих мер может остановить деградацию и обеспечить устойчивое водопользование в регионе.

Список литературы

1. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Кузякина М.В. О техногенной деградации речных систем в Восточном Приазовье: гидрографический аспект // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 243. DOI: 10.46698/14469-5379-6925-р.

2. Погорелов А.В., Лагута А.А. Техногенное разрушение речных систем Восточного Приазовья (на примере рек Понура и Кирпили) // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15, № 3. – С. 226–238. DOI: 10.46698/vnc.2025.37.79.001.

3. Григоренко К.С., Матишов Г.Г. Минерализация малых водотоков Восточного Приазовья в современных маловодных условиях//Метеорология и гидрология. – 2025. – № 11.

4. Григоренко К.С. Интервью по результатам мониторинга рек Восточного Приазовья // Южный научный центр РАН. – 01.04.2026.

5. Вестник РАН. – 2023. – Т. 93, № 12. – С. 1127–1135.

6. Матишов Г.Г. О маловодном цикле на Дону // Вести. Дон. – 31.03.2025.

7. Еремина, Д. С. Современное состояние рек Восточного Приазовья в условиях климатических изменений и антропогенной нагрузки // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2024. – Т. 1, № 9. – С. 47-52. – DOI 10.23885/2500-395X-2024-1-9-47-52.

8. Реки Ростовской области засолились из-за исчезновения весеннего половодья // inforostov.ru. – 02.04.2026.

9. Расчистка русел рек играет ключевую роль в сохранении экологического баланса // Коммерсантъ. – 29.08.2025.

10. В Стародеревянковской продолжается расчистка реки Челбас // Официальный сайт администрации Каневского района. – 18.07.2025.

11. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 декабря 2025 г. № 4140-р «Об утверждении Стратегии устойчивого развития Приазовья на период до 2040 г.».

12. Стратегия развития Приазовья до 2040 года включает создание системы экологического мониторинга // mk-donbass.ru. – 14.01.2026.

МЕЛИОРАТИВНЫЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕМ В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ

Пыленок П.И.
ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» - Мещерский филиал, г. Рязань
E-mail: petr.pylenok@yandex.ru

Аннотация. На основе экосистемного анализа и натурных исследований на мелиоративно-болотных стационарах Мещерской низменности выполнено обоснование ресурсосберегающих технологий управления водопользованием в болотных экосистемах. Раскрыто содержание и принципы создания природоподобных технологий мелиорации и ренатурализации мелиорируемых болотных агроландшафтов. Разработаны технологические показатели и условия применения гидромелиоративного рециклинга. Предлагаемые технологии позволяют создавать экологический каркас мелиорируемого агроландшафта и обеспечивать приоритетное использование возобновляемых водных ресурсов.

Ключевые слова: гидромелиорация, водосбережение, болотные экосистемы, рециклинговые технологии.

RECLAMATION RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR WATER MANAGEMENT IN SWAMP ECOSYSTEMS OF THE NON-CHERNOZEM ZONE OF RUSSIA

Pylenok P.I.
All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov - Meshchersky branch, Ryazan
E-mail: petr.pylenok@yandex.ru

Annotation. On the basis of ecosystem analysis and field studies at the melioration and swamp hospitals of the Meshcherskaya lowland, a justification of resource-saving technologies for managing water use in swamp ecosystems was carried out. The content and principles of creating nature-like technologies for land reclamation and renaturalization of reclaimed marsh agrolandshafts are disclosed. The technological parameters and conditions for the use of hydro-reclamation recycling have been developed. The proposed technologies make it possible to create an ecological framework for a reclaimed agricultural landscape and ensure the priority use of renewable water resources.

Keywords: hydro-reclamation, water conservation, swamp ecosystems, recycling technologies.

Мелиорация болот в Мещерской низменности впервые была произведена экспедицией генерала Жилинского в конце XIX века для улучшения условий произрастания заболоченных лесов, выращивания кормов для животноводства, сплава леса и улучшения санитарных условия для населения. Осушение казенных земель было выполнено открытыми каналами. С последующим развитием техники осушения от открытых каналов к зарытому дренажу, от осушительных систем к осушительно-увлажнительным гидромелиоративным системам (ГМС) сопровождалось с одной стороны ростом продуктивности осушаемых земель, а с другой - проявлением неблагоприятных последствий антропогенного воздействия на природу [1,2,3,4,5,6,7,15,16 и др.].

Основные негативные факторы мелиоративного воздействия на окружающую природную среду (ОПС) связаны с понижением уровня грунтовых вод и увлажненности в зоне влияния ГМС в результате стациально-деструкционной нагрузки на ОПС, а также с мелиоративными отходами, а именно дренажным стоком и эмиссией углекислого газа (ингредиентная нагрузка на ОПС). Дренаж усиливает промываемость почв с выносом растворимых соединений в гидросферу и сопровождается загрязнением природных вод водоприемников мелиоративных систем дренажными водами [3,4]. При осушении дренажный сток в полном объеме сбрасывается в водоприемник и создает неизбежные риски загрязнения и эвтрофирования природных вод. Осушительно-увлажнительные системы с водозабором природных вод кроме отмеченного недостатка осушительных систем создают определенные ограничения для других водопользователей [5,8,10,11,17].

Обозначенные проблемы отчасти смягчаются в случае применения осушительно-увлажнительных систем с повторным использованием дренажных вод.

Целью настоящей работы является научное обоснование ресурсосберегающих природоподобных мелиоративных технологий при управления водопользованием в болотных экосистемах.

Материалы и методы включают экосистемный анализ, метод водного баланса, законы экологии и натурные исследования на мелиоративно-болотных стационарах, выполненные в соответствии с действующими методиками [1,3,5,7,11,15].

Мелиоративные ресурсосберегающие технологии управления водопользованием в болотных экосистемах рассматриваются как комплекс современных подходов, направленных на формирование оптимального мелиоративного режима как совокупности требований к управляемым факторам почвообразования, роста растений и воздействия на окружающую среду, обеспечивающих эффективное хозяйственное использование мелиорируемых болотных агроландшафтов, сохранение и восстановление их продуктивности, повышение экологической устойчивости и пожарной безопасности при максимальном использовании внутренних водных ресурсов и минимальном привлечении внешних водных ресурсов.

С экосистемных позиций обозначенные цели достигаются в случае применения природоподобных технологий, которые занимают промежуточное положение между саморегулируемыми природными системами и созданными и управляемыми человеком антропогенными системами. В качестве основных критериев для оценки природоподобия агромелиоративных систем, как наиболее обширного класса антропогенных систем, предлагается использовать оценки экологической обстановки, энерго- и ресурсоемкость, устойчивость, замкнутость потоков энергии и веществ, рециклинг отходов и биоразнообразие.

Центральное место среди этих технологий занимает гидромелиоративный рециклинг - наиболее прогрессивная, хотя и наименее разработанная технология, которая подобно замкнутым круговоротам в большом геологическом и малом биотическом круговоротах замыкает технологические процессы осушения и увлажнения в единый цикл путем повторного использования дренажных вод, объединяет два противоположных процесса: слияние водных потоков (при осушении) и разделение (бифуркацию) водных потоков при орошении [8,9,10].

В отличие от традиционного подхода гидромелиоративный рециклинг предполагает многократное повторение цикла увлажнения во времени и пространстве на одной территории. Его ключевая особенность – многократное использование

исключительно внутренних водных ресурсов водосбора (дренажного стока) и формирование экологического каркаса мелиорируемого агроландшафта [8,9,11,12,13].

В зависимости от масштаба и продолжительности накопления воды выделяются три типа гидромелиоративного рециклинга:

1. Оперативный рециклинг: использование дренажного стока в режиме реального времени (без накопителей или с суточным/недельным регулированием).
2. Сезонный рециклинг: накопление дренажного стока в прудах-накопителях в весенний период для использования в засушливые периоды того же года.
3. Многолетний рециклинг: аккумуляция дренажного стока во влажные годы для использования в засушливые годы (обеспечивает максимальную площадь увлажнения).

Для различных природно-мелиоративных условий нами установлены технологические показатели и условия применения технологий оперативного, сезонного и многолетнего гидромелиоративного рециклинга, представленные в табл.1.

В формулах, приведенных в табл. 1, используются следующие обозначения:

$F_{ос}$ - площадь осушения, га; q_i –модуль дренажного стока расчетной обеспеченности i-го периода, л/с га; t_i - продолжительность i-го периода, сут. $F_{увл}$ - площадь увлажнения дренажными водами, га; $m_{бр}$ – поливная (разовая) норма увлажнения, мм; $M_{бр}$ - сезонная (оросительная) норма увлажнения, мм; t_{min} - продолжительность минимального межполивного интервала, сут; $t_{вес}$ – продолжительность посевного периода стока; $t_г$ – продолжительность заполнения накопительных емкостей при многолетнем регулировании. R – радиационный баланс поверхности почвы, кДж/см^2; ε –доля увеличения R от мелиораций; L- скрытая теплота парообразования, кДж/см^2 в год на 1 мм слоя воды; P- атмосферные осадки, впитавшиеся в почву, мм; g- влагообмен корнеобитаемого слоя почвы с грунтовыми водами (положительное направление вверх), мм.

Таблица 1 - Технологические показатели и условия применения гидромелиоративного рециклинга

Показатели	Тип рециклинга		
	Оперативный	Сезонный	Многолетний
Площадь увлажнения	$F_{увл}^{опер} = \mathbf{8{,}64}\frac{F_{ос}}{m_{бр}}\sum_{1}^{t_{min}} q_i t_i$	$F_{увл}^{сез} = \mathbf{8{,}64}\frac{F_{ос}}{M_{бр}}\sum_{1}^{t_{вес}} q_i t_i$	$F_{увл}^{мн} = \mathbf{8{,}64}\frac{F_{ос}}{M_{бр}}\sum_{1}^{t_г} q_i t_i$
Доля увлажнения осушаемых земель, %	до 20-30%	До 50-70%	До 100%
Объем аккумулирования дренажных вод	Водозабор из живого тока проводящей сети	$W_п = \mathbf{10}\left(\frac{(\mathbf{1}+\varepsilon)R}{L} - P - g\right)F_{увл}$	$W_{чп} = \mathbf{86{,}4}F_{ос}\sum\left(q_i t_i\right)$
Техника аккумулирования	Шлюзы-регуляторы на каналах, колодцы-регуляторы на коллекторах	Каналы-накопители, оснащенные регуляторами верхнего и нижнего бьефов	Пруды-накопители и каналы накопители
Условия применения	Грунтовый и грунтово-напорный ТВП	Грунтовый ТВП	Атмосферный ТВП

Для практической реализации рециклинговых технологий рекомендуется использовать специальные конструкции осушительно-увлажнительных ГМС, классификация которых выполнена нами ранее [8,9,10,13]. Наиболее эффективное и гибкое управление подачей и качеством воды обеспечивают системы с каскадным расположением прудов и каналов-накопителей, которые в истоке оснащаются регуляторами уровня воды нижнего бьефа, а в устье – регуляторами уровня воды верхнего бьефа. Чередование узлов слияния и бифуркации водного потока обеспечивает максимальное использование водных ресурсов территории и снижает антропогенную мелиоративную нагрузку. Наиболее полно это достигается в разработанной новой конструкции ГМС ландшафтно-ярусного типа [14].

Рассматриваемые водосберегающие технологии внедрены в практику проектирования. Один из ярких примеров успешного применения этой технология - проект восстановления (ренатурализации) выработанных торфяников объекта «Завидово», расположенного в границах Московской и Тверской областей [8,9,10].

Экологические принципы ренатурализации болотных экосистем базируется на нескольких ключевых принципах:

· Адекватности: система должна функционально соответствовать природным закономерностям.

· Совместимости: учет природно-антропогенной совместимости всех элементов.

· Пространственного и видового разнообразия: сложная структура и экологический каркас повышают устойчивость ландшафта к внешним воздействиям.

· Приоритетного использования возобновляемых ресурсов: В первую очередь используется дренажный сток (45 %) и ресурсы почвенной влаги (возобновляемость более 30%).

Для восстановления водного режима осушенной торфяной залежи требуется подать объем воды, сопоставимый с тем, который отводился при осушении - он может достигать 3000 м³/га при коэффициенте водоотдачи низинных торфов 0,05–0,24.

Эти технологии позволяют не только сохранять водные ресурсы, но и снижать выбросы парниковых газов, так как дренажные каналы способствуют накоплению углерода в донных отложениях.

Преимущества и достигаемые цели при рециклинговом увлажнении торфяных почв, выявленные в процессе натурных исследований на мелиоративно-болотных стационарах Кальское, Вожа, Макеевский мыс, Тинки-II и др., разделяются по пяти направлениям.

1. Борьба с ускоренной минерализацией и осадкой поверхности осушаемого торфяника. Осушенный торф окисляется, выделяет CO_2, объем торфа при этом уменьшается, потери органического вещества торфа составляют около 10 т/га в год при нормативном осушении и возрастают в 1,5 раза при глубоком осушении. Поверхность осушенного торфа, не имеющая жесткого минерального каркаса, опускается со скоростью 1-4 см в год. Увлажнение дренажными водами замедляет этот процесс, одновременно создает условия для повышения продуктивности в 1,5 и более раз [9,13].

2. Снижение выбросов парниковых газов. Осушенные торфяники - гигантские источники эмиссии CO_2. При повышении УГВ и влажности торфа ослабевают аэробные процессы и усиливаются анаэробные, что резко сокращает выбросы CO_2. Хотя может увеличиться выброс метана (CH_4). Однако в долгосрочной перспективе баланс является положительным для смягчения изменения климата.

3. Повышение экологической устойчивости снижение рисков торфяных пожаров, сохранение ценного природного ресурса - торфа. Влажный торф не горит. Увлажнение самый эффективный способ предотвратить катастрофические антропогенные пожары, которые регулярно происходят на осушенных болотах.

4. Формирование экологического каркаса и улучшение биоразнообразия. Благодаря повышению влажности почв, увеличению площади мелководных водоемов, частично возвращаются типичные болотные растения, животные и птицы. Восстанавливается ценная водно-болотная экосистема.

5. Водосбережение и улучшение качества воды. Нормы увлажнения оптимизируются с учетом притока солнечной энергии. Задерживая сток, торфяник действует как естественный фильтр, поглощающий взвешенные частицы и излишки питательных веществ (азот, фосфор). В реки попадает более чистая вода и снижается поступление загрязненных дренажных вод.

Одновременно приходится отметить проблемы и риски рассматриваемых мелиоративных технологий, которые подлежат управлению.

1. Качество аккумулируемых дренажных вод. При интенсивном использовании мелиорируемых торфяных почв в сельском хозяйстве дренажные воды могут содержать в высоких концентрациях биогенные элементы (азот, фосфор из удобрений) и пестициды. По нашим данным в зависимости от интенсивности осушения и сельскохозяйственного использования вынос за теплый период азота изменяется от 12 до 45 кг/га, калия от 8 до 12 кг/га, фосфора от 0,5 до 7 кг/га. Возврат такой воды может привести к эвтрофикации воды в накопительных емкостях и загрязнению самой

осушаемой территории. Необходим регулярный агроэкологический мониторинг, включающий гидрохимический анализ.

2. Подтопление смежных земель и элементов инфраструктуры. Некорректный гидрологический расчет может привести к подтоплению дорог, зданий или соседних сельскохозяйственных угодий. Требуется тщательное планирование и моделирование водного баланса.

3. Изменение растительного покрова. Для сельскохозяйственных предприятий увеличение площадей под влаголюбивыми травами может вызвать необходимость корректировать специализацию хозяйства (например, с растениеводства на мясо-молочное скотоводство).

4. Финансовые затраты. Строительство высокотехнологичных систем, оснащенных шлюзами-регуляторами, насосными станциями, каналами и прудами-накопителями дренажных вод, дождевальными машинами требует повышенных первоначальных инвестиций, что удлиняет срок окупаемости. Отчасти это может быть компенсировано за счет снижения платы за уменьшенный сброс дренажных вод.

В итоге можно сформулировать ключевые условия для успешной реализации технологий увлажнения осушаемых торфяников дренажными водами. Это детальное изучение водного баланса при проектировании осушительно-увлажнительных систем в целом и систем рециклингового типа в особенности. Необходимо точно рассчитать, сколько дренажных вод и атмосферных осадков поступает, сколько уходит в виде испарения и стока, и какой объем дренажного стока может быть утилизирован в процессе увлажнения в конкретных гидрометеорологических условиях.

Крайне важно ведение агроэкологического мониторинга с оснащением рециклинговой ГМС метеостанцией, водомерными постами, сетью наблюдательных скважин для контроля уровня грунтовых вод на всей территории, а также проведение гидрохимического анализа дренажных и природных вод.

В заключение отметим, что утилизация дренажного стока в процессе гидромелиоративного рециклинга — это не просто обводнение осушенного торфяника, а высокоэффективная технология продуктивного сельскохозяйственного или лесохозяйственного использования мелиорируемых торфяных почв и частичного, а при необходимости и полного восстановления водно-болотных угодий. Она позволяет переводить деградирующие торфяники из состояния проблемы (как источник CO_2 и пожаров) в состояние природоподобного актива в виде более устойчивой экосистемы, которая обеспечивает производство сельскохозяйственной продукции и одновременно работает на благо биоразнообразия и климата.

Хотя метод требует тщательной подготовки и инвестиций, он является наиболее перспективным и экологически правильным направлением использования осушенных торфяников в условиях изменения климата.

Список литературы

1. Агроэкология / В.А. Черников, Р.М. Алексахин, А.В. Голубев и др.; Под ред. В.А. Черникова, А.И. Чекереса.- М.: Колос, 2000. – 536 с.

2. Айдаров И.П. Проблемы природопользования и природообустройства в России и пути их решения. Монография. – М.:ФГОУ ВПО МГУП, 2010. - 94 с.

3. Голованов А.И. Ландшафтоведение /А.И. Голованов, Е.С. Кожанов, Ю.И. Сухарев. – М.: КолосС, 2005. - 216 с.

4. Зайдельман Ф.Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов: учебник. – М.:КДУ, 2009. -720 с.

5. Маслов Б.С. Осушительно-увлажнительные системы / Б.С. Маслов, В.С. Станкевич, В.Я. Черненок. – М.: Колос, 1981. -280 с.

6. Маслов Б.С. Болото и пиар природных стихий. 2-е издание, переработанное и дополненное./ Б.С. Маслов, П.И Пыленок. – М.: ВНИИГиМ, 2019. -76 с.

7. Пьявченко Н.И. Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение. – М.: Наука, 1985. – 152 с.

8. Пыленок П.И. Гидромелиоративный рециклинг. Научное обоснование, технология, экология. –LAMBERT Academic Publishing, 2018.-258 с.

9. Пыленок П.И. Основы гидромелиоративного рециклинга // Мелиорация и водное хозяйство. 2019. № 5. С. 57-61.

10. Пыленок П.И., Ефремов Р.О. Экологические требования к факторам воздействия мелиорации болот на окружающую среду.// Мелиорация и водное хозяйство, 2024, №4, с.83-86.

11. Пыленок П.И. Гидрология дренажа. Научно-технологическое обоснование осушительно-увлажнительных систем.- М.: ВНИИГиМ, 2024. – 172с.

12. Пыленок П.И. Формирование экологического каркаса агроландшафта// В сб.: Инженерная биология в современном мире. - Майкопский государственный технологический университет, 2019. С. 107-112

13. Пыленок П. И. Ресурсосберегающая технология увлажнения осушаемых торфяных почв дренажными водами / П. И. Пыленок, Р.О. Ефремов // Вестник мелиоративной науки. 2024. № 1. С. 37-42.

14. Пыленок, П. И. Мелиоративная осушительно-увлажнительная система ландшафтно-ярусного типа. Опубл.: 05.11.2025 Бюл. № 31. [Текст] / П. И. Пыленок, Р. О. Ефремов // Патент РФ 2850072 C1, МПК 02B 11/00; A01G 25/00.

15. Семенова К.С. Обоснование противопожарного шлюзования осушенных торфяников в условиях Мещерской низменности/Дисс.. канд.техн. наук.-М,, 2016. 130 с.

16. Шебеко В.Ф. Влияние осушения на речной сток и испарение / В.Ф.Шебеко, П.И. Закржевский // Гидротехника и мелиорация,1975, №8, с. 49-55

17. Шевченко В.А. Новый этап развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса российской федерации / В.А. Шевченко С.Д.Исаева, Э.Б.Дедова// Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 4. С. 355-361.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА В НИЖНЕЙ ВОЛГЕ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СПЕЦИАЛЬНОГО ВЕСЕННЕГО ПОПУСКА С ВОЛГОГРАДСКОЙ ГЭС ВЕСНОЙ 2026 ГОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Яковлев С.В.[1], Косолапов А.Е.[1], Горелиц О.В.[2], ***Капустин М.В****.[1], Бут К.С.[1]*
[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Ростов-на-Дону,
[2] Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва
E-mail: *mihail.kapustin@voda.gov.ru*

Аннотация: В докладе представлены результаты организации и проведения оперативного мониторинга обводнения бассейна Нижней Волги в период весеннего специального попуска с Волгоградской ГЭС 2026 года с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Мониторинг охватывал Волго-Ахтубинскую пойму и дельту р. Волги, включая западные подстепные ильмени, в границах 15 муниципальных районов Волгоградской, Астраханской областей и Республики Калмыкия. Оценка динамики обводнения выполнялась на основе оптических и радиолокационных космических снимков с применением метода последовательной актуализации данных и системы относительных показателей (кратность превышения меженного уровня, доля от максимального значения, степени обводнения по завершению прохождения волны половодья). Показана практическая значимость адресных данных по муниципальным образованиям для оперативного управления режимами сбросов. Обоснована необходимость продолжения мониторинга с переходом к более детальному уровню наблюдений — на участках дноуглубительных работ, нерестилищах и ключевых транзитных водотоках.

Ключевые слова: бассейн Нижней Волги, Волго-Ахтубинская пойма, дельта р. Волги, западные подстепные ильмени, дистанционное зондирование Земли.

ORGANIZATION OF OPERATIONAL MONITORING IN THE LOWER VOLGA DURING THE SPECIAL SPRING WATER RELEASE FROM THE VOLGOGRAD HYDROELECTRIC POWER PLANT IN 2026 USING EARTH REMOTE SENSING DATA

Yakovlev S.V.[1], Kosolapov A.E.[1], Gorelits O.V.[2], ***Kapustin M.V.[1],*** *But K.S.[1]*
[1]Federal State Budgetary Institution "Russian Research Institute for Complex Use and Protection of Water Resources", Rostov-on-Don
[2]Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia
E-mail: *mihail.kapustin@voda.gov.ru*

Abstract: The paper presents the results of organizing and conducting operational monitoring of the inundation of the Lower Volga basin during the special spring water release from the Volgograd Hydroelectric Power Plant in 2026 using Earth remote sensing data. The monitoring covered the Volga–Akhtuba floodplain and the Volga River delta, including the Western Sub-Steppe Ilmens, within the boundaries of 15 municipal districts of the Volgograd and Astrakhan regions and the Republic of Kalmykia. The assessment of inundation dynamics was based on optical and radar satellite imagery using a sequential data updating method and a system of relative indicators (the ratio of the current flooded area to the low-water baseline, the share of the maximum value, and the degree of inundation after the passage of the flood wave). The practical significance of spatially explicit data for municipal districts in supporting operational water release management is demonstrated. The need for further monitoring with a transition to a more detailed level of observation is substantiated, including dredging sites, fish spawning grounds, and key transit watercourses.
Keywords: Lower Volga basin, Volga–Akhtuba floodplain, Volga River delta, Western Sub-Steppe Ilmens, Earth remote sensing.

Введение

Зарегулирование стока р. Волги каскадом гидроузлов коренным образом изменило гидрологический режим Нижней Волги, что выразилось в сокращении продолжительности и высоты половодья, снижении его максимальных расходов, увеличении меженных расходов и изменении динамики русловых процессов [1]. Форма гидрографа половодья является ключевым фактором, определяющим обводнение не только пойменных территорий, но и системы ериков, каналов, озер и ильменей. Наполнение этой гидрографической сети возможно только при прохождении половодья с достаточно высокими расходами и уровнями воды. От степени обводнения бассейна Нижней Волги напрямую зависят условия естественного воспроизводства рыб (включая ценные виды), водообеспеченность орошаемого земледелия и хозяйственно-питьевое водоснабжение населенных пунктов, удаленных от основной водной артерии – р. Волги.

Для разработки научно-обоснованных мероприятий, обеспечивающих восстановление и устойчивое функционирование экосистемы бассейна Нижней Волги, а также для оперативного управления режимами обводнения, необходима организация постоянного мониторинга. Особую актуальность приобретает оперативный мониторинг в период специального весеннего попуска с Волгоградской ГЭС (далее – весенний спецпопуск), позволяющий оценивать фактическую динамику залития поймы.

Организация оперативного мониторинга в бассейне Нижней Волги сопряжена с рядом объективных сложностей, к числу которых следует отнести:

– значительную площадь исследуемой территории (порядка 3,6 млн га), включающую Волго-Ахтубинскую пойму и дельту р. Волги с западными подстепными ильменями;

– нестабильность приема спутникового навигационного сигнала, затрудняющая полеты беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);

– отсутствие четко установленных границ нерестилищ полупроходных и речных видов рыб, что затрудняет их мониторинг [2];

– повышенная облачность, характерная для данного региона в весенний период, ограничивающая возможности применения оптической космической съемки;

– необходимость получения на регулярной основе оперативных данных о динамике обводнения поймы, что в совокупности с большой площадью обследуемой территории делает маршрутные обследования малопригодными.

Методика и исходные данные

На первом этапе выполнено уточнение границ водосборной площади Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги (включая ЗПИ) на основе цифровой модели рельефа. Учитывая масштаб исследуемой территории, а также необходимость формирования более детальных результатов мониторинга, деление бассейна исключительно на Волго-Ахтубинскую пойму и дельту р. Волги признано нецелесообразным. При столь большой площади оперативное обновление данных о состоянии всей территории единовременно технически нереализуемо. Исходя из этого, территория мониторинга была разделена на участки, соответствующие границам муниципальных районов Волгоградской и Астраханской областей, а также Республики Калмыкия.

До наступления половодья 2026 г. выполнен ретроспективный анализ динамики и степени обводнения территории Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги (включая ЗПИ) за последние 13 лет по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это позволило выявить предельные значения степени обводнения территорий муниципальных образований в бассейне Нижней Волги для последующей оперативной оценки текущей водохозяйственной обстановки непосредственно в ходе весеннего спецпопуска 2026 года.

Оперативный мониторинг обводнения Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волга осуществлялся в период с 01.04.2026 по 06.07.2026 на основе общедоступных данных ДЗЗ, полученных с оптических сенсоров космических аппаратов Landsat 8,9, Sentinel - 2 и с радиолокационных сенсоров с космических аппаратов Sentinel-1. Приоритетным источником информации являются оптические спутниковые данные, при дешифрировании которых наиболее надежно выделяется открытая водная поверхность, непосредственно наблюдаемая на снимке. Вода характеризуется низким отражением в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах, что позволяет применять водные индексы и получать хорошо интерпретируемые контуры открытой водной поверхности. Кроме того, оптические изображения обеспечивают удобный визуальный контроль результатов дешифрирования, что особенно важно для пойменных территорий со сложным сочетанием русел, стариц, временных водоемов, влажных почв и

растительности [3]. Радиолокационные данные с синтезированной апертурой (РСА/SAR), в отличие от оптических, могут быть получены независимо от облачности и времени суток [4], однако точность идентификации границ обводнения поймы существенно ниже, чем при анализе оптических снимков.

Поскольку космическая съемка не всегда обеспечивает полное покрытие территории муниципальных районов на конкретную дату (из-за ширины полосы обзора или наличия облачности), оценка общей площади обводнения выполнялась методом последовательной актуализации данных. Для каждой новой съёмки фактически отснятая территория обновлялась по результатам дешифрирования, тогда как для участков, оставшихся вне зоны покрытия, в том числе покрытых облаками и тенями от них, сохранялась площадь обводнения, установленная по наиболее позднему из имеющихся предшествующих снимков.

Таким образом, алгоритм по актуализации данных об обводнении территории бассейна Нижней Волги включает в себя следующие этапы:

– создание базовой мозаичной карты обводнения бассейна Нижней Волги на начало половодья (01.04.2026);

– формирование маски отснятой территории по новому космическому снимку с исключением площади занятой облаками и тенями от них;

– вырезание маски отснятой территории по новому космическому снимку из базовой мозаичной карты;

– дешифрирование водной поверхности на новом космическом снимке;

– формирование новой мозаичной карты обводнения бассейна Нижней Волги на дату обрабатываемого космического снимка путем слияния результатов дешифрирования с обрезанной базовой мозаичной картой (полученная новая мозаичная карта обводнения бассейна Нижней Волги на дату космоснимка будет являться базовой при обработке новых космических снимков).

Для оценки достоверности результатов, полученных методом последовательной актуализации, для каждого муниципального образования рассчитывался показатель «Доля покрытия территории космоснимком, %». Данный показатель позволил фильтровать и исключать из сравнительного анализа данные, обладающие низкой степенью актуализации на текущую дату.

При количественной оценке динамики и степени обводнения территории Нижней Волги в период прохождения весеннего спецпропуска использовался набор относительных показателей, рассчитываемых для каждого муниципального района на основе данных дистанционного зондирования Земли.

В качестве базового (фонового) значения для каждой территории принималась площадь открытой водной поверхности, зафиксированная в предпаводковый (меженный) период (01.04.2026).

Для каждой даты наблюдений (по мере поступления новых космоснимков) по районам рассчитывались следующие показатели:

1. Абсолютная площадь обводнения (S, га) — суммарная площадь открытой водной поверхности, выделенная по результатам дешифрирования актуализированной мозаики.

2. Кратность превышения площади обводнения до начала половодья (K) — отношение текущей площади обводнения к предпаводковой:

$$K = S / S_{меж}$$

Показатель позволяет оценивать, во сколько раз увеличилась площадь водной поверхности относительно меженного состояния.

3. Достижение максимального обводнения (%). Для каждого района определялась максимальная площадь обводнения, зафиксированная за весь период спецпопуска 2026 года ($S_{макс2026}$). Текущее значение выражалось в процентах по отношению к максимуму:

$$D = S / S_{макс2026} \times 100\%$$

Анализ динамики проводился по двум ключевым характеристикам:

1. Скорость достижения высокого обводнения — интервал времени (в сутках) от момента выхода Волгоградского гидроузла на максимальные расходы (начало «Сельскохозяйственной полки») до даты, когда показатель *D* для данного района впервые достигал порогового значения 80%.

2. Продолжительность удержания высокого обводнения — количество суток, в течение которых показатель *D* оставался на уровне не ниже 80% от максимального для данного района значения.

Оценка степени обводнения территории по завершению прохождения волны половодья (к началу июля) рассчитывалась относительно предпаводкового меженного состояния:

$$R = (S_{июль} / S_{меж}) \times 100\%$$

где $S_{июль}$— площадь обводнения на конец периода наблюдений. Полученная величина (в процентах) характеризует долю сохранившихся паводочных вод сверх естественного меженного уровня.

Применение относительных показателей (кратности превышения, доли от максимума, степени обводнения территории по завершению прохождения волны половодья) обеспечивает корректное сравнение территорий с различной площадью и

исходной гидрографической сетью, что особенно важно при анализе столь неоднородного региона, как бассейн Нижней Волги.

Результаты

Весенний спецпопуск 2026 года на Волгоградском гидроузле осуществлялся с 11 апреля по 15 июня. Как правило, при осуществлении весеннего спецпопуска гидрограф половодья включает две основные фазы: «Сельскохозяйственную полку», характеризующуюся максимальными расходами и обеспечивающую первоочередное наполнение пойменных территорий, и «Рыбохозяйственную полку», предназначенную для удержания уровней воды, необходимых для нереста и развития молоди рыб.

Отличительной чертой весеннего спецпопуска 2026 года являлась его выраженная многоступенчатость. В целом режим сбросов из Волгоградского водохранилища в период половодья 2026 г. повторял режим притока, лишь немного сглаживая небольшие колебания. Водохранилище в этот период работало в режиме пропуска волны половодья, поступающей с вышележащих гидроузлов. В гидрографе весеннего спецпопуска 2026 года выделено пять последовательных ступеней: 7 суток расходом около 26 000 м³/с; 7 суток — 24 000 м³/с; 11 суток — 23 000 м³/с; 8 суток — 19 000 м³/с; 7 суток — 16 000 м³/с.

Суммарный объем стока в период спецпопуска составил 106 км³. Это в два раза превышает показатель маловодного 2025 года (52 км³) и выше среднемноголетней величины за последние 25 лет (82 км³). Тем не менее, объем 2026 года значительно уступает наиболее многоводному за последние годы 2020 году (150 км³). Совмещенный график расходов за 2020, 2025 и 2026 годы приведен на рис. 1.

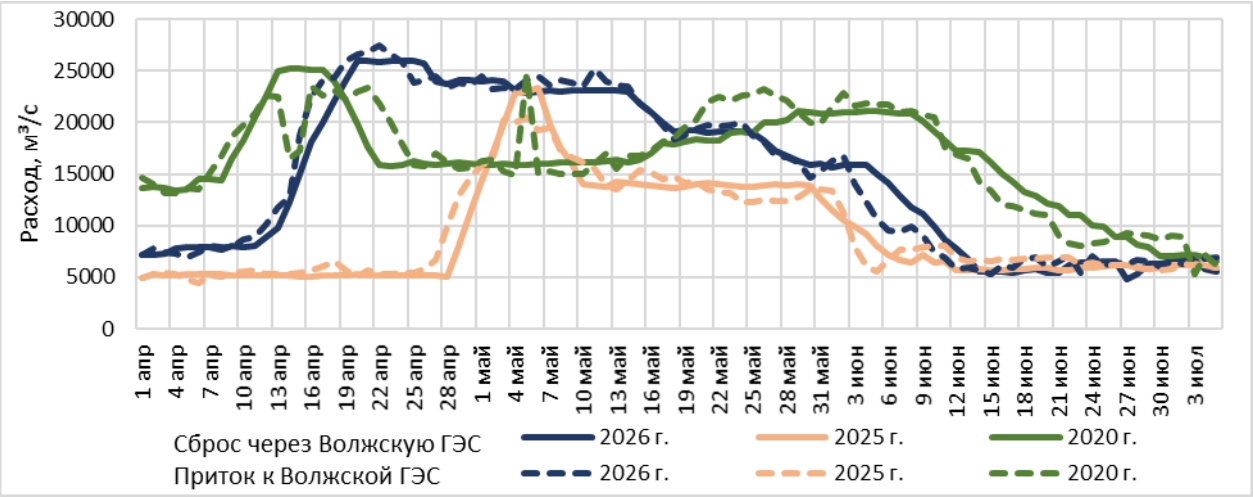


Рис. 1 – График сброса воды с Волгоградского гидроузла в спецпопуск 2020, 2025 и 2026 гг.

Сравнение с ретроспективными данными (2013–2025 гг.) показало, что в 2026 году степень обводнения, близкая к максимальной (более 90% от максимальных значений за предыдущие годы), была достигнута в Ленинском (Волгоградская обл.),

Юстинском (Калмыкия), Володарском, Икрянинском и Камызякском (Астраханская обл.) муниципальных районах.

Степень обводнения муниципальных районов в пределах бассейна Нижней Волги относительно площади обводнения в предпаводковый период, скорость наступления, а также продолжительность периода, в котором сохраняется повышенная степень обводнения, существенно различаются, как между собой, так и внутри Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги. На указанные параметры влияет множество факторов, в том числе удаленность района от Волгоградского гидроузла, его площадь, наличие естественных или искусственных водоемов, высотных отметок ключевых водных артерий, обводняющих системы ериков, проток и водоемов, а также наличие в границах района русла р. Волги или её крупных рукавов и р. Ахтуба.

В рамках Волго-Ахтубинской поймы площадь обводнения территории Ленинского муниципального района превысила показатель в предпаводковый период в два раза уже до выхода гидроузла на максимальные расходы и снизилась только к 24 июня. На пике половодья разница достигала 7 и более раз и удерживалась в период с 8 по 23 мая. Также следует отметить степень обводнения территории Харабалинского района, для которой площадь обводнения в период с 11 мая по 5 июня превышала предпаводковые значения в 7 и более раз, в Среднеахтубинском муниципальном районе – в период с 6 по 21 мая превышало в 6 раз, Енотаевском муниципальном районе – в период с 6 мая по 4 июня превышало в 3 раза. Для остальных муниципальных районов в пределах Волго-Ахтубинской поймы площадь обводнения в период спецпопуска 2026 года по сравнению с предпаводковыми значениями была больше в 2 раза. В среднем по Волго-Ахтубинской пойме этот показатель увеличился более чем в 4 раза (рис. 2).

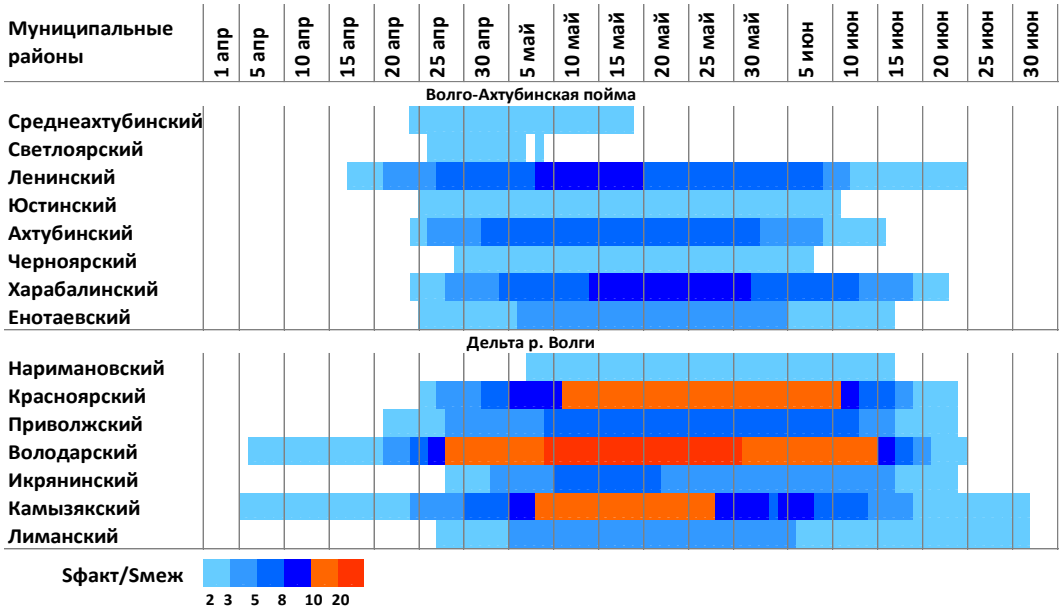


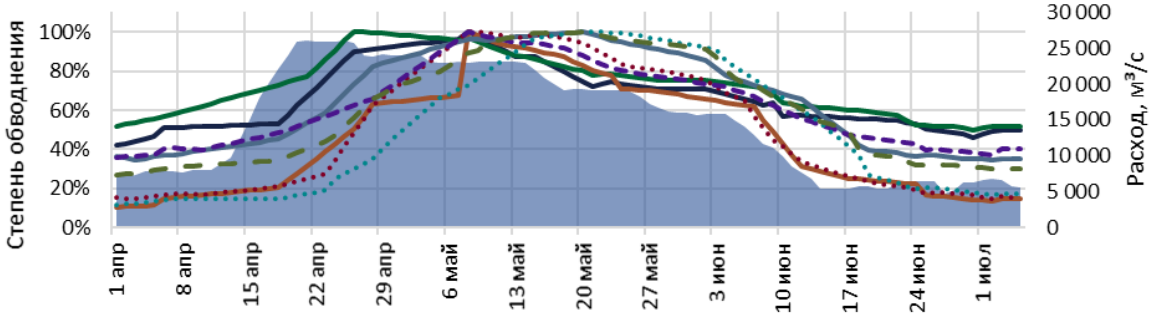
Рис. 2 – Соотношение фактической площади обводнения территории к меженной по муниципальным районам Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги

Если рассматривать динамику обводнения территории Волго-Ахтубинской поймы до максимальных значений (более 80% от максимума 2026 года) выделяются наиболее близко расположенные к гидроузлу Светлоярский и Среднеахтубинский муниципальные районы, а также Юстинский муниципальный район, который существенно меньше остальных по площади и включает русло р. Волги и небольшой участок поймы, при этом поддержание высоких значений площадей обводнения происходит в нем существенно дольше остальных муниципальных районов (рис. 3).

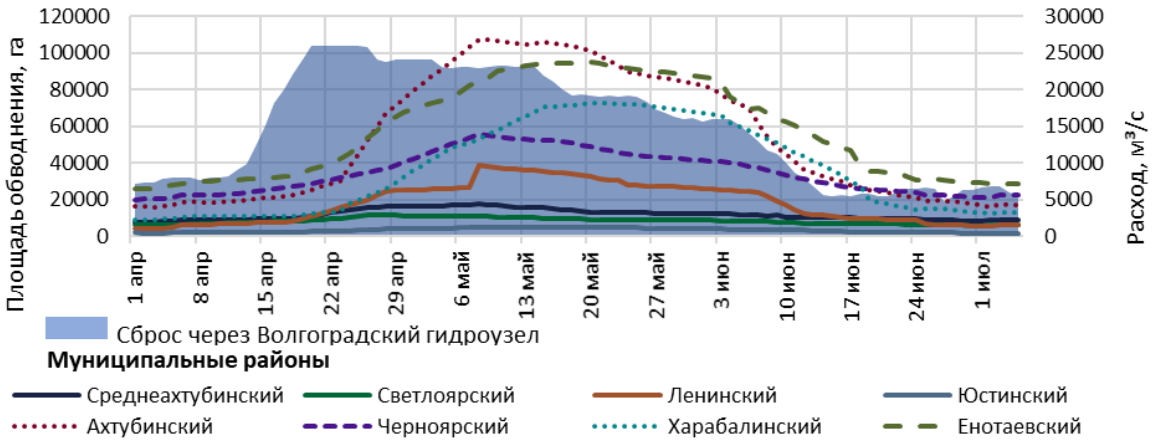
Позже остальных в пределах Волго-Ахтубинской поймы максимальное обводнение наступает в Харабалинском муниципальном районе. В среднем по Волго-Ахтубинской пойме удержание высоких значений площадей обводнения по муниципальным районам составляет 26 дней. Исключение составляет Ленинский район, где максимальные площади сохранялись лишь в течение двух недель.

В пределах дельты р. Волги зафиксированы максимальные различия между предпаводковым и максимальным обводнением. Показательным примером является территория Володарского муниципального района, площадь обводнения которой по сравнению с предпаводковым состоянием увеличилась в 24 раза, также существенное увеличение площадей обводнения зафиксировано на территории Красноярского и Камызякского муниципальных районов – в 12 раз. В среднем по дельте р. Волги площадь обводнения за период спецпопуска увеличилась практически в 8 раз (рис.2).

По динамике обводнения территории дельты р. Волги до максимальных значений установлено, что по всем муниципальным районам данный показатель преодолевал отметку в 80% от максимума 2026 года на 16-20 сутки после выхода гидроузла на максимальные расходы и удерживается, как правило, в течение месяца (рис.4).



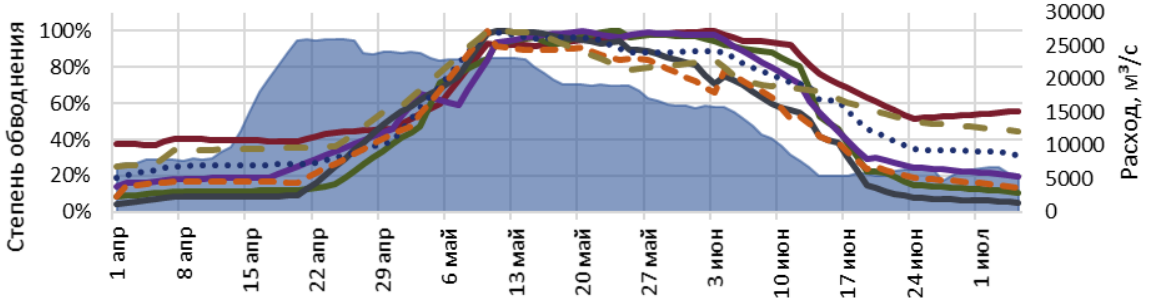
а)



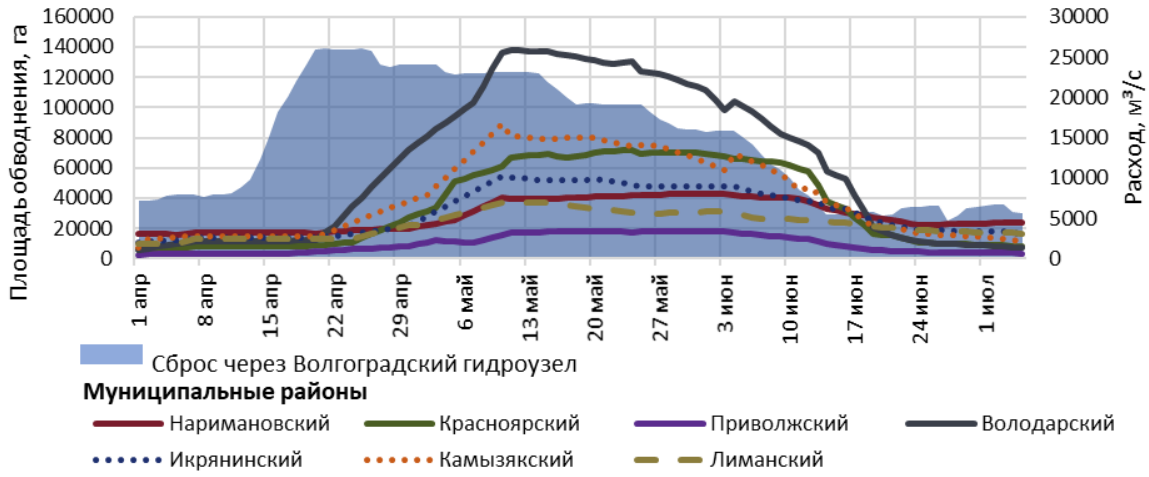
б)

Рис. 3 – Совмещенный график весеннего спецпопуска Волгоградского гидроузла в 2026 г., степени обводнения относительно максимума 2026 г. (а) и площади обводнения (б) муниципальных районов в пределах Волго-Ахтубинской поймы

После прохождения волны половодья (к началу июля) на ряде территорий произошло снижение площади обводнения до предпаводковых значений. В Светлоярском, Юстинском и Ахтубинском муниципальных районах площади обводнения вернулись к меженным значениям. Площади обводнения на конец половодья, превышающие меженные значения на 20%, сохранились в Среднеахтубинском, Черноярском, Енотаевском и Володарском муниципальных районах. Превышение площади обводнения на конец половодья до 50% от меженных значений зафиксировано в Ленинском и Харабалинском муниципальных районах за счет сложной системы ериков, проток и водоемов, в Наримановском муниципальном районе за счет наполнения западных подстепных ильменей, а также в Приволжском муниципальном районе за счет обводнения рисовых чеков и рыбоводных прудов, часть из которых используется в том числе для восстановления плодородия засоленных после риса земель [5]. Наибольшее превышение площади обводнения на июль месяц относительно предпаводковых значений (до 80%) наблюдалось в Икрянинском, Лиманском и Камызякском муниципальных районах, что связано с наполнением западных подстепных ильменей и наличием искусственных водоемов (рисовые системы и рыбоводные пруды).



а)



б)

Рис. 4 – Совмещенный график весеннего спецпопуска Волгоградского гидроузла в 2026 г., степени обводнения относительно максимума 2026 г. (а) и площади обводнения (б) муниципальных районов в пределах дельты р. Волги

Карты-схемы, отображающие степень обводнения Волго-Ахтубинской поймы, дельты р. Волга, в том числе территорий западных подстепных ильменей, на начало половодья, после прохождения половодья и максимальное обводнение за период наблюдения в 2026 году, с приложением совмещенных графиков сброса с Волгоградского гидроузла и динамики обводнения территории приведены на рисунках 5-8. При подсчете степени обводнения Волго-Ахтубинской поймы (рисунок 5) принималась сумма площадей обводнения территорий Среднеахтубинского, Светлоярского, Ленинского, Юстинского, Ахтубинского, Черноярского, Харабалинского и Енотаевского районов, в рамках мониторинга дельты р. Волги (рисунки 6 и 7) принималась сумма площадей обводнения территорий Наримановского, Красноярского, Приволжского, Володарского, Икрянинского, Камызякского и Лиманского районов. Максимальная площадь обводнения Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волга рассчитывалась как сумма максимальных площадей обводнения соответствующих районов, зафиксированных в различные даты прохождения весеннего спецпопуска из Волгоградского водохранилища.

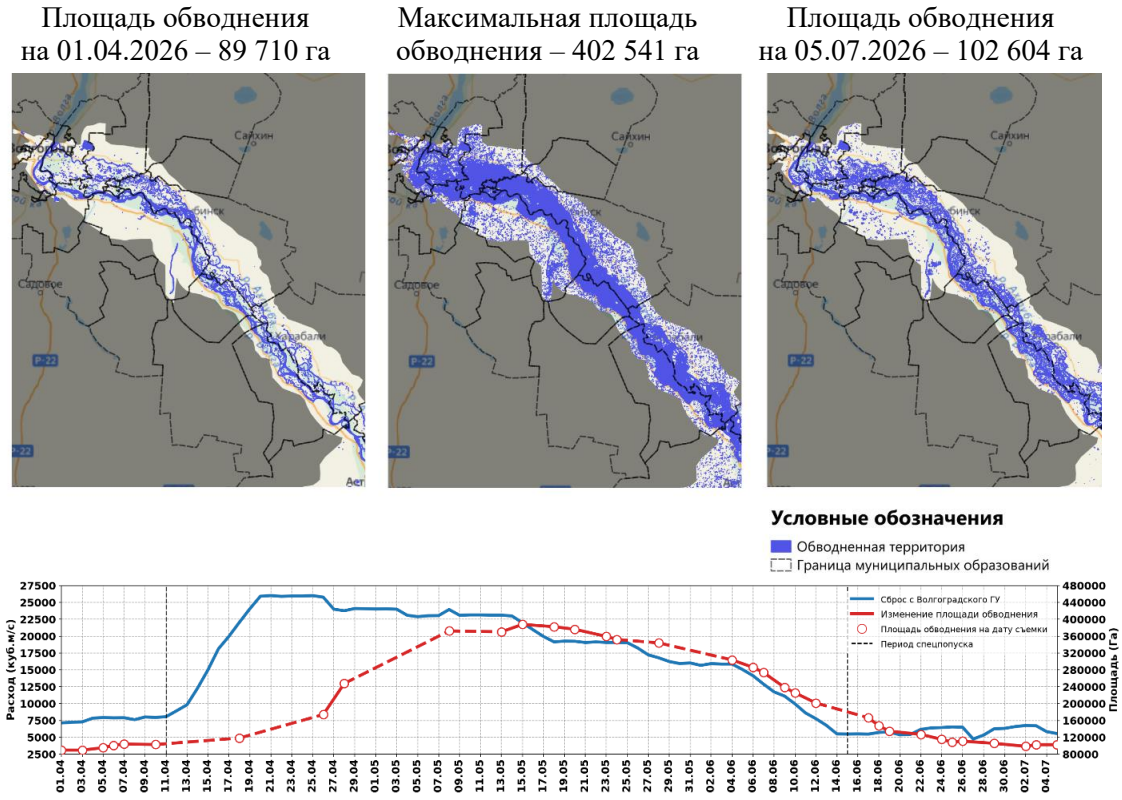


Рис. 5 – Карта-схема и динамика обводнения Волго-Ахтубинской поймы в период прохождения специального попуска из Волгоградского водохранилища

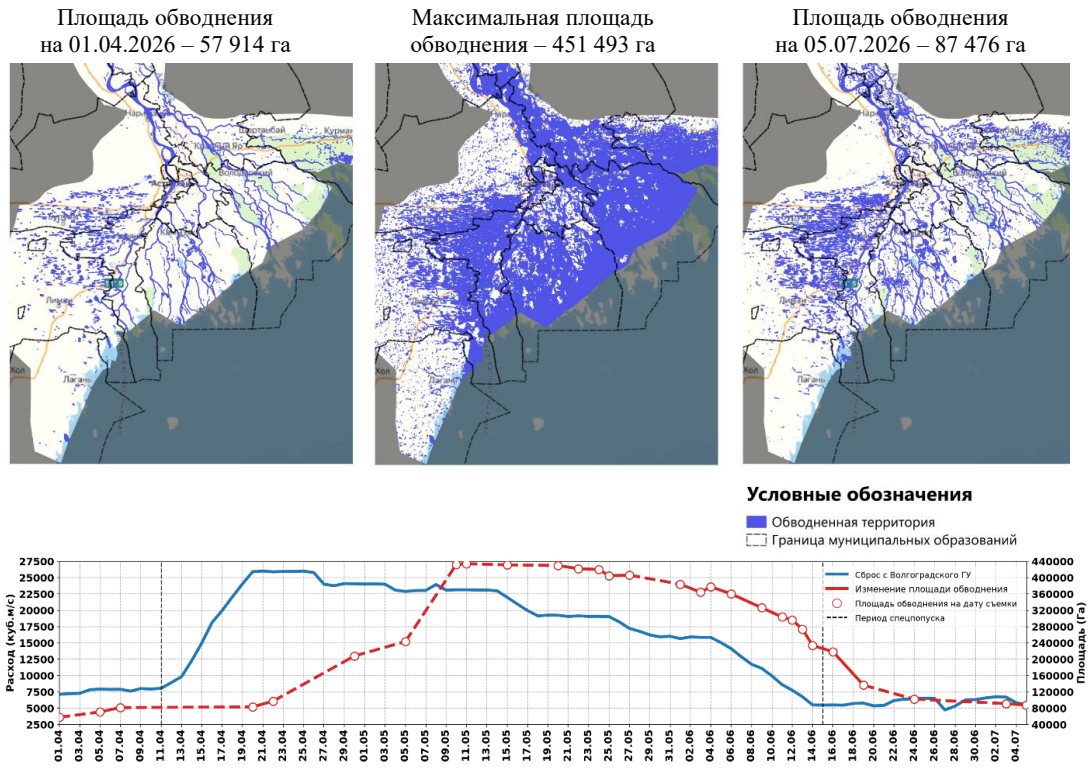


Рис. 6 – Карта-схема и динамика обводнения дельты р. Волга в период прохождения специального попуска из Волгоградского водохранилища

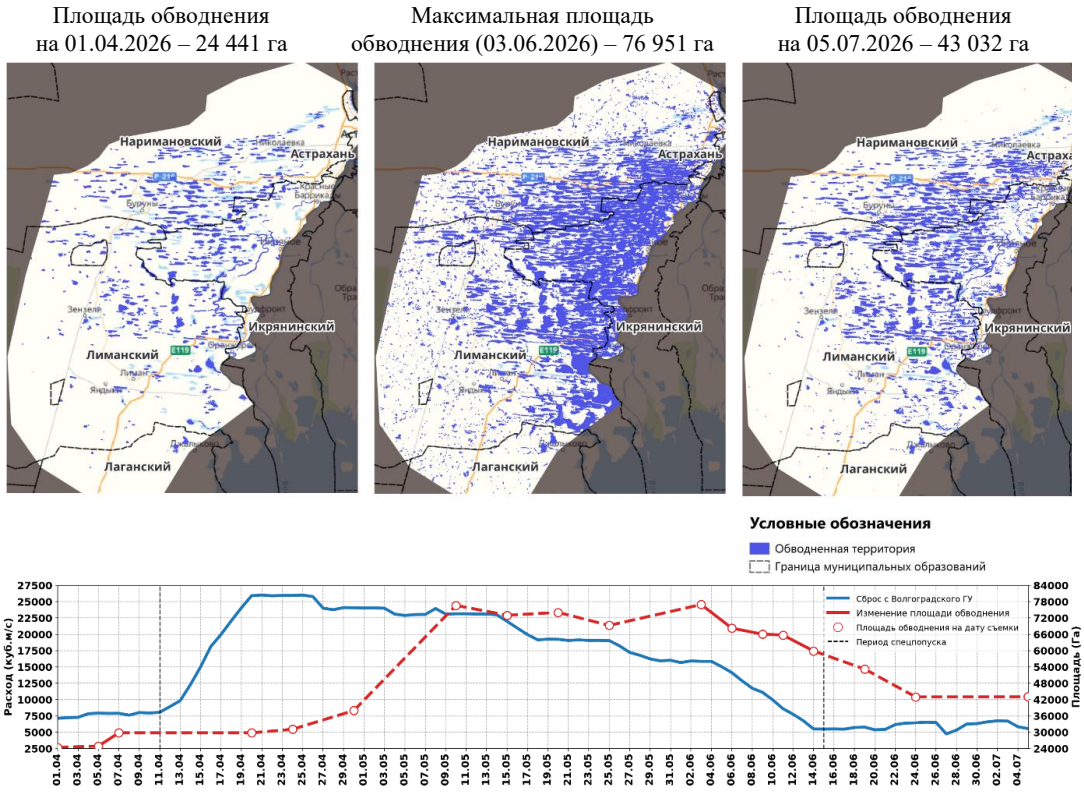


Рис. 7 – Карта-схема и динамика обводнения западных подстепных ильменей в дельте р. Волга в период прохождения специального попуска из Волгоградского водохранилища

Заключение

В рамках выполненной работы апробирован подход к организации оперативного мониторинга обводнения бассейна Нижней Волги в период прохождения весеннего специального попуска с Волгоградской ГЭС, основанный на использовании общедоступных данных дистанционного зондирования Земли и метода последовательной актуализации мозаик обводнения. Применение данного подхода позволило сформировать сопоставимую во времени и пространстве информационную основу для оценки динамики залития Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги, включая западные подстепные ильмени.

Апробация подхода в условиях весеннего спецпопуска 2026 года позволила получить ряд значимых результатов.

Выполнен анализ пространственно-временной неоднородности процессов обводнения. В пределах Волго-Ахтубинской поймы нарастание площади обводнения происходило быстрее, а ее сработка — интенсивнее, чем в дельте. Для дельтовых районов характерно более позднее достижение максимальных значений (на 16–20 сутки после выхода гидроузла на максимальные расходы), но при этом существенно более продолжительное удержание высоких площадей обводнения (до месяца и более).

Установлено, что ключевую роль в сохранении повышенной площади обводнения после прохождения волны половодья играют естественные и искусственные емкости: западные подстепные ильмени, рисовые чеки, рыбоводные пруды, а также сложные пойменные системы ериков и проток. Наибольшая степень обводнения территории относительно предпаводковых значений зафиксирована в Икрянинском, Лиманском и Камызякском муниципальных районах.

Практическая значимость выполненной работы определяется адресностью получаемых результатов. Наличие количественных данных о степени, скорости и продолжительности обводнения по каждому муниципальному образованию с привязкой к гидрографу Волгоградского гидроузла позволяет лучше понять происходящие в бассейне Нижней Волги процессы обводнения в период осуществления весеннего спецпопуска, а также выполнять оперативную оценку состояния территорий и использоваться при обосновании управленческих решений при установлении режимов сбросов с Волгоградского гидроузла в период половодья.

Вместе с тем мониторинг 2026 года выявил ограничения, определяющие направления дальнейших работ. Анализ обводнения по муниципальным районам в целом усредняет показатели происходящих в нем процессов и не отражает состояние отдельных критически важных участков. В связи с этим продолжение систематических наблюдений в последующие годы должно сопровождаться переходом к более детальному уровню мониторинга, включающему:

– участки, на которых ранее выполнялись дноуглубительные работы и расчистка русел ериков и проток, — для оценки фактической эффективности мероприятий по восстановлению водопропускной способности;

– участки нерестилищ полупроходных и речных видов рыб — для установления фактических дат их залития, продолжительности удержания воды и сопоставления с температурным режимом;

– ключевые транзитные водотоки, обеспечивающие подачу воды в западные подстепные ильмени, — для диагностики причин их недостаточного или несвоевременного обводнения;

– зоны сопряжения «река–пойма» (устьевые участки ериков, водопропускные сооружения), где наиболее отчетливо проявляются изменения пропускной способности.

Таким образом, продолжение оперативного мониторинга с последовательным увеличением детализации наблюдений (вплоть до отдельных индикаторных участков) является необходимым условием перехода от фиксации общих площадей залития к

оценке эффективности конкретных водохозяйственных и рыбохозяйственных мероприятий, реализуемых в бассейне Нижней Волги.

Список литературы

1. Горелиц О.В., Землянов И.В. Современный механизм заливания территорий Волго-Ахтубинской поймы в период половодья (в пределах Волгоградской области). // В сб. «Научный потенциал регионов на службу модернизации». Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2013. – № 2 (5). Спецвыпуск. С.9-18.

2. Об утверждении правил рыболовства для Волжско-Каспийского рыбохозяйственного бассейна: [Электронный ресурс]: Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 октября 2022 г. № 695 Постановление Правительства Российской Федерации от 10 апреля 2007 г. №219 – Система ГАРАНТ, 1990-2026 – Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405732583/ (дата обращения 24.08.2026).

3. Катаев М. Ю., Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям/ М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров // Доклады ТУСУРа – Томск, 2017. – Том 20, № 4. – С. 105 – 108.

4. Айталина Г.В., анализ возможности применения радиолокационных данных дистанционного зондирования для оперативного определения зон паводкового подтопления/ Айталина Г.В., Чермошенцев А.Ю. // В сб. «Интерэкспо Гео-Сибирь», 2019 – С. 39 – 44.

5. Соколов А.С., Продуктивность картофеля на рекультивируемых землях/ Соколов А. С., Соколова Г. Ф., Соколов С. Д., Соколова А. С. // В сб. «Аграрный вестник Урала», 2016. – С. 18 – 21.

РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИРОДЫ ДЛЯ МЕЛИОРАЦИИ ГОРНЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ НА ПРИМЕРЕ ТАДЖИКИСТАНА

Домуллоджанов Д.Х.
Государственное Учреждение Таджикский Научно-Исследовательский Институт Гидротехники и Мелиорации (ГУ ТаджикНИИГиМ), Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан (МЭВР), г. Душанбе
Email: daler79@gmail.com

Аннотация: В статье представлены результаты внедрения трёх природоосновaнных решений в горных агроландшафтах Таджикистана на примере подбассейнов рек Кызылсу и Исфана: (1) строительство водных резервуаров в земляной ложе для сбора дождевой и талой воды; (2) возведение плетневых заграждений (палисадов) для запружинивания и постепенного заполнения оврагов; (3) посадка засухоустойчивых масличных культур с использованием противоэрозионных методов. В период с 2009 по 2012 год в бассейне р. Кызылсу были построены резервуары в земляной ложе объёмом от 300 до 1500 м³, которые наполнялись до 30 раз за сезон и обеспечивали водопой скота, а также повышение урожайности пастбищ в 2–3 раза за счёт фильтрации воды вниз по склону и подсева трав на увлажненных территориях

ниже водоёмов. Плетневые заграждения, возведённые из местных материалов, показали высокую эффективность при ширине оврагов до 1,7 м: после первых дождей овраги заполнялись наносами на 0,3–0,45 м, а дальнейшее заиливание прекращалось благодаря закреплению склонов растительностью. В период с 2019 по 2021 год посев сафлора сорта «Шифо» на деградированных склоновых землях с применением контурной вспашки и глубоких борозд позволил увеличить коэффициент использования осадков с 0,36–0,39 до 0,94–0,98 и получить урожайность 3966 кг/га, что в 2,24 раза превысило контрольные показатели

Ключевые слова: решения, основанные на природе, предотвращение деградации земель, сбор дождевой воды, запруживание оврагов, плетневое заграждение, палисад.

NATURE-BASED SOLUTIONS FOR AMELIORATION OF MOUNTAIN AGROLANDSCAPES: THE CASE OF TAJIKISTAN

Domullodzhanov D.Kh.
State Institution Tajik Research Institute of Hydraulic Engineering and Melioration (SI TajikNIIGiM), Ministry of Energy and Water Resources of the Republic of Tajikistan (MEWR), Dushanbe
Email: daler79@gmail.com

Abstract: The article presents the results of implementing three nature-based solutions in mountain agrolandscapes of the Kyzylsu and Isfana river sub-basins: (1) construction of earthen-bed water reservoirs for harvesting rainwater and snowmelt; (2) construction of wattle barriers (palisades) for gully plugging and gradual sedimentation; and (3) cultivation of drought-tolerant oilseed crops using anti-erosion methods. Between 2009 and 2012, earthen-bed reservoirs with capacities ranging from 300 to 1,500 m³ were constructed in the Kyzylsu river basin. These reservoirs filled up to 30 times per season, providing livestock watering and contributing to a 2–3-fold increase in pasture productivity through water infiltration and grass reseeding. Wattle barriers constructed from local materials demonstrated high effectiveness in gullies up to 1.7 m wide: after the first rainfall events, gullies were filled with sediments to a depth of 0.3–0.45 m, and further sedimentation ceased as slopes became stabilized by vegetation. Between 2019 and 2021, cultivation of safflower (variety "Shifo") on degraded sloping lands using contour tillage and deep furrowing increased the rainfall utilization coefficient from 0.36–0.39 to 0.94–0.98, achieving a yield of 3,966 kg/ha—2.24 times higher than the control.

Keywords: nature-based solutions, land degradation prevention, rainwater harvesting, gully plugging, brushwood, palisade.

Республика Таджикистан является горной страной на 93% состоящей из горных систем Тянь-Шаня, Гиссаро-Алая и Памира [1]. На начало 2025 года население страны составляло более 10,5 млн человек, из которых более 71,1% местного населения живут в сельской местности [2], доля ВВП от сельского хозяйства составляет 22,9% [3], около 22,8% трудоспособного населения трудоустроены в секторе сельского хозяйства [4], где получение высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур в условиях аридной зоны без орошения является невозможным.

Из общей площади 141,38 тыс. км^2 около 5,4% составляют орошаемые площади [5] т. е. около 0,074 га на душу населения. По данным ФАО проведенная оценка динамики продуктивности земель показывает, что продуктивность снижается или находится в стрессовом состоянии на 34,4% территории страны. Страна сильно подвержена деградацией почв: 70% пашни уже деградировала, где проживают около 10% населения страны [6].

В условиях малоземелья в стране [7], крутые горы, водная и ветровая эрозия и перевыпас серьёзно вредят сельскому хозяйству и продовольственной безопасности

страны [6]. Деградация земель представляет собой снижение качества и продуктивности почв, обусловленное эрозией [8], засолением [9], обеднением почвенных питательных веществ [7], иными процессами, уменьшающими потенциал земель для ведения сельского хозяйства и функционирования экосистем.

В большей части деградация земель прогрессирует из-за использования неустойчивых практик ведения сельского хозяйства на склоновых и предгорных землях, вырубка лесов, чрезмерного выпаса скота, острой нехватки финансирования и высококвалифицированных кадров в секторе сельского хозяйства.

Дополнительно к этому дисбалансу из-за повышения температуры воздуха, изменения в распределении осадков и повышения их интенсивности выпадания в осенний и весенний периоды участились проявления чрезвычайных ситуаций в виде селей, оползней и наводнений, которые негативно влияют на водную и гражданскую инфраструктуру.

С целью поддержки устойчивого управления природными ресурсами в горных агроландшафтах бассейнов рек и распространения наилучших технологий был исследован ряд природоподобных решений в подбассейнах Кызылсу и Исфана Сырдаринской и Пянджской бассейновой зоны Таджикистана. В данной статье приводятся результаты внедрения нескольких природоподобных биолого-инженерных защитных сооружений включающих:

- Водные резервуары в земляной ложе для сбора дождевой и талой воды с поверхности земли из промоин и оврагов в верховьях водосборных территорий.
- Устройство плетневых преград для предотвращения развития промоин и оврагов, а также для постепенного их заполнения.
- Посадка засухоустойчивых масличных культур для восстановления деградированных склоновых земель водосборных территорий с использованием противоэрозионных методов.

Водные резервуары в земляной ложе были использованы на пастбищах, сенокосах и богарных сельскохозяйственных землях с различной степенью влагообеспеченности расположенных на пригорных, низкогорных, среднегорных и горных острозасушливых агроландшафтах, которые находятся выше орошаемых площадей. Природоосновaнные решения направлены на улавливания, накопления и эффективного использования дождевой и талой воды, с целью предотвращения эрозии и деградации земель, оврагообразования, селей, увеличения влажности почв и их использования для увеличения продуктивности пастбищ и урожайности засухоустойчивых масленичных культур.

Для возведения водных резервуаров для сбора дождевой воды с помощью программы Гугл планета Земля были определены площади водосборных бассейнов и потенциальные места устройства водных резервуаров сверху вниз по течению. Была проведена оценка природно-климатических условий, существующей ситуации природных ресурсов, землепользования, водообеспечения земель и выявление основных причин эрозии и деградации почв, оврагообразования. Были рассчитаны объемы избыточной дождевой воды и необходимые объемы резервуаров. На основании визуального осмотра были уточнены месторасположение резервуара, определены места выемки водонаправляющих траншей из оврагов в резервуар и автосброс из резервуара обратно в овраги. Для предотвращения смыва насыпной части резервуара поперечное сечение, подводящей и отводящей траншей было одинаковым.

Земляные работы по возведению водных резервуаров вдоль оврагов проводились до начала сезона дождей - до января-февраля. В зависимости от условий месторасположения в бассейне р. Кызылсу юж. объемы резервуаров составляли от 300 $м^3$ до 1500 $м^3$, максимальная глубина не более 1,5 м, форма резервуаров – полусферическая.

В период с 2009-2012 гг. были построены водные резервуары примерно на 8 водосборных территориях в Темурмаликском, Бальджуванском и Ховалингском районах бассейна Кызылсу. После начала сезона выпадения атмосферных осадков с января-февраля до мая-июня резервуары частично или полностью наполнялись до 15-30 раз талой и дождевой водой, а с октября до января около 5-10 раз. Собранная вода использовалась для водопоя домашнего скота, внедрения пастбищеоборота, фильтрация воды увлажняла нижерасположенные склоны. Урожайность пастбищ увеличилась в 2 – 3 раза по сравнению с предыдущими годами за счет фильтрации воды из резервуаров расположенных в верховьях водосборных бассейнов, подсева трав (изень, ежа сборная, житняк, кострец безостый, и др.) и подкормки, рис 1 и рис. 2.



Рис. 1 - Водный резервуар в земляной ложе для сбора дождевой и талой воды в подбассейне р. Кызылсу юж.

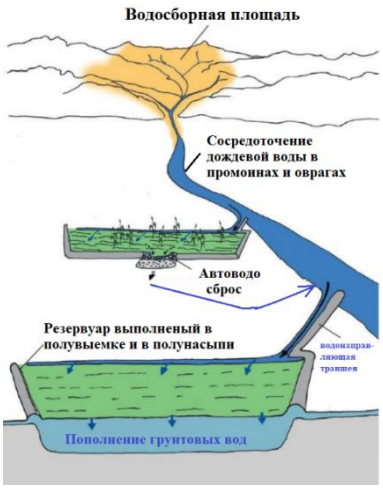


Рис 2. - Схема расположения водных резервуаров [12]

Также, в разные годы обеспеченности построенные водные резервуары значительно улучшили водопой домашних животных, выпасающих на пастбищах от 4 до 6 месяцев.

В результате строительства водных резервуаров резко снизился объем избыточной дождевой и талой воды в оврагах. После устройства резервуаров за время наблюдения не проявлялись случаи прохождения селевых потоков и их негативного влияния на увеличение размеров оврагов и развитие эрозии и деградации земель в тех водосборных территориях, где проводились очистные мероприятия резервуаров после завершения сезона. Так как дождевая и талая вода имеет большую транспортирующую способность, часть твердого стока осаждается в резервуарах. Очень важно проводить регулярные очистные мероприятия для поддержания проектной ёмкости резервуаров, предотвращения их заиливания и обеспечения долговременной эффективности задерживания твёрдого стока, продления срока их службы. В качестве недорогого биологического-инженерного защитного сооружения для запруживания овражных русел, был использован палисад или плетневая преграда. Плетневые преграды очень эффективны при запруживании оврагов шириной до 1,5 м и глубиной до 1 м. Это биологического-инженерного защитного сооружение устраивают из местных материалов.

В подбассейне реки Кызылсу вблизи села Дороби в феврале 2009 года были возведены плетневые преграды для запруживания оврагов шириной около 1,3-1,7 м на участке 415 м. Технология строительства включает забивку черенков ивы диаметром 3-5 см в подготовленные отверстия интервалом 5 см, глубиной не менее двух третей (0,3-0,35 м) длины черенка (0,5-0,6 м), с выступанием над поверхностью около 15-20 см, и связывание черенков с поперечной балкой ивы диаметром 8-10 см, заанкеренной в бортах оврага на глубину 0,2-0,3 м, рис 3. Для плетней использовали ветки шелковицы диаметром 1-2 см. На крутых участках палисад дополнительно укрепляется камнем и грунтом со стороны нижнего склона. Плетневые преграды можно использовать при уклоне дна оврага до 60^0. Расстояние между сооружениями составляло от 10 до 25 м, рис 4.

После возведения плетневых преград измерения заполнения оврагов наносами, транспортируемыми дождевой водой, показали, что после первых 2-3 весенних дождей овраги заполнились наносами на 0,3-0,45 м вдоль оврага. По мере потепления воздуха и произрастания зеленого травянистого защитного слоя почвы в верховьях водосборного бассейна заполнение оврагов за преградами уменьшилось до 3-5 см.

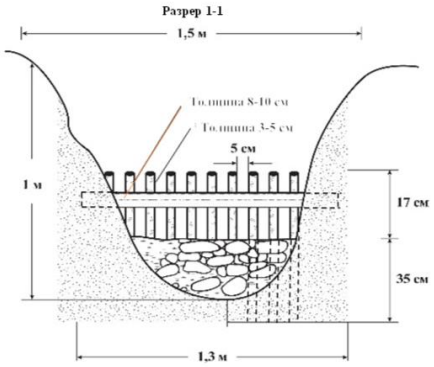


Рис. 3 - Поперечное сечение полисада [11]

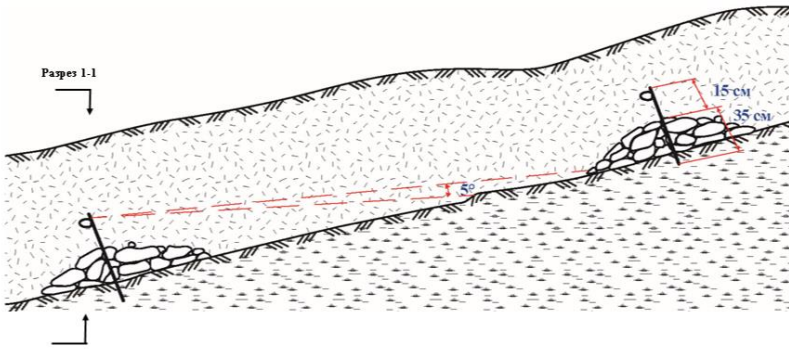


Рис. 4 - Продольный профиль оврага с возведенными полисадами [11]

Новые плетневые преграды возводились на расстоянии 1–1,5 м вверх по течению от существующих преград, когда те заполнялись на 0,4–0,45 м. За первый год новые плетневые преграды возводились по всей длине оврага всего лишь 2 раза, рис. 5, 6 и 7.



Рис. 5 - Плетневое заграждение, февраль 2009 г., [11]



Рис 6. - Плетневое заграждение, ноябрь 2009 г., [11]



Рис 7. - Плетневое заграждение, июль 2011 г., [11]

Для снижения расхода воды, смывной силы потока и предотвращения проявления селевых потоков в оврагах, в верховьях водосборной территории были построены 2 водных резервуара в земляной ложе для сбора дождевой и талой воды. Также вдоль оврагов с двух сторон были посеяны семена эспарцета «Зидди» и люцерны сорта «Вахш-300».

В последующие годы дождевая и талая вода в частично заполненные овраги стекала сравнительно чистой со значительно меньшим количеством наносов и заполнение оврагов не наблюдалось в связи с обрастанием оврагов и водосборной территории однолетними и многолетними травами, а также улавливанием и накоплением части избыточной воды и наносов в водных резервуарах, расположенных выше по течению.

В качестве третьего природоосновательного решения было выбрано - посев засухоустойчивых масличных культур для восстановления деградированных склоновых

земель, расположенных на низкогорных и среднегорных агроландшафтах с интегрированием: противоэрозионных методов (контурная вспашка, нарезка глубоких борозд вдоль горизонталей), органических удобрений и более ранних сроков посадки.

С 2019 по 2021 годы были заложены демонстрационные участки с посевами сафлора сорта «Шифо» на склоновых деградированных богарных землях низкогорного и среднегорного агроландшафтов подбассейна реки Исфана расположенном в районе Джаббора Расулова (1 га), годовые осадки составили 217-303 мм. Целью закладки участка было восстановление деградированных богарных склоновых земель с более ранними сроками подготовки земли, использованием противоэрозионных мер и посадкой семян сафлора, рис. 8 и 9.



Рис. 8 - Демо участок с посевами сафлора сорта «Шифо», срок посева 5 февраля 2020 г.



Рис. 9 - Демо участок с посевами сафлора сорта «Шифо», срок посева 10 января 2020 г. + противоэрозийные мероприятия

Земельный участок был подготовлен в начале октября 2019 года с предварительным внесением органических удобрений 20 т/га. Высококачественные семена сафлора сорта «Шифо» были посеяны раньше за 26 дней до 10 января 2020 г. по сравнению с контролем (5 февраля 2020), были использованы противоэрозионные меры для более эффективного улавливания дождевых вод, т.е. контурная вспашка, нарезка глубоких борозд вдоль горизонталей глубиной до 0,6-0,7 м вдоль линии горизонталей с интервалом 5-9 м. в зависимости от уклона склона, коэффициент использования осадков (μ) составлял 0,94-0,98. В 2021 году были посеяны на 30 дней раньше, чем вариант контроль. В случае контроля коэффициент использования осадков составлял 0,36–0,39. В варианте контроль также было внесено 20 т/га органических удобрений перед посевом. В результате урожай составил 3966 кг/га, который был в 2,24 раза больше контроля. Результаты посева сафлора сорта «Шифо» в условиях предгорных и горных агроландшафтах бассейна реки Вахш показали идентичные результаты.

Основываясь на выше приведенных результатах, можно сделать вывод, что комплексное применение представленных низкозатратных природоосновaнных решений

способствует снижению эрозии и деградации земель, повышению продуктивности пастбищ и сельскохозяйственных культур, улавливанию карбона, а также укреплению продовольственной безопасности в условиях горных и предгорных агроландшафтов Таджикистана.

1. Строительство водных резервуаров в земляной ложе объёмом от 300 до 1500 м³ в верховьях водосборных территорий позволило: 1) снизить объём избыточной дождевой и талой воды, поступающей в овраги, что предотвратило прохождение селевых потоков и развитие эрозии; 2) улучшить обеспечение водопой домашнего скота на период 4-6 месяцев и внедрение пастбищеоборота; 3) повысить урожайность пастбищ в 2–3 раза за счёт фильтрации воды, подсева многолетних трав и подкормки.

2. Плетневые заграждения, возведённые из местных материалов в оврагах шириной до 1,5 м, показали высокую эффективность в борьбе с овражной эрозией:

1) после первых 2–3 весенних дождей заполнение оврагов наносами достигло 0,3–0,45 м;

2) по мере зарастания склонов травянистой растительностью заполнение оврагов уменьшилось до 3–5 см;

3) Комплексное применение плетневых заграждений совместно с водными резервуарами и посевом многолетних трав обеспечило долгосрочную стабилизацию овражных русел и предотвратило дальнейшую деградацию земель.

3. Посев сафлора сорта «Шифо» на деградированных богарных склоновых землях с применением противоэрозионных методов (контурная вспашка, нарезка глубоких борозд вдоль горизонталей глубиной до 0,6–0,7 м), ранние сроки посадки (на 26-30 дней раньше контроля) и органических удобрений (20 т/га) позволил: 1) увеличить коэффициент использования осадков с 0,36–0,39 до 0,94–0,98; 2) получить урожайность 3966 кг/га, что в 2,24 раза превысило контрольные показатели.

Список литературы

1. Таджикистан. // Природа и природные ресурсы. И-во.: Дониш. Душанбе. 1982 г.

2. Источник: www.tajstat.tj на состояние 1 января 2025 г.

3. Источник: http://data.stat.tj/Home/show/452?lang=tj на состояние 2022 г.

4. Источник: http://data.stat.tj/Home/show/348?lang=ru на состояние 2023 г.

5. Государственный комитет по землеустройству и геодезии Республики Таджикистан. Земельный фонд Республики Таджикистан на 1 января 2024 г. – Душанбе. – 2025. – 146 с. (для внутреннего пользования).

6. FAO. 2021. Overview of land degradation neutrality (LDN) in Europe and Central Asia. LDN in Tajikistan. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb8122en

7. Quillérou, E., Thomas, R.J., Guchgeldiyev, O., Ettling, S., Etter, H., & Stewart, N. (2016). Economics of Land Degradation (ELD) Initiative: Broadening options for improved economic sustainability in Central Asia. Synthesis report. // Report for the ELD Initiative from the Dryland Systems Program of CGIAR c/o ICARDA, Amman, Jordan. Available from www.eld-initiative.org

8. Мансуров Б.А., Саидзода Р.Ф., Ятимов Б.К. Эрозионные процессы в орошаемых хлопкосеющих землях северного Таджикистана. С. 197-201. https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/197-201_5.pdf

9. Salimzoda A.F., Mahmadyorzoda U.M., Boimurodov R.B., and Bobokhonova Z.K. The salinization problems and soil hydromorphism as components of land desertification, irrigated zone of Tajikistan and he liquidation ways of them. // Web of Conferences. Volume 254, 2021. International Scientific and Practical Conference "Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations" (FARBA 2021). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125405008

10. Пятый национальный доклад по сохранению биологического разнообразия РТ. Душанбе. 2014. 152 с. https://www.cbd.int/doc/world/tj/tj-nr-05-ru.pdf

11. Домуллоджанов Д.Х. Охрана и использование природных ресурсов бассейна реки Исфана в сельском хозяйстве. Монография. Худжанд: И-во I-print, 2020. - 113 с. (на таджикском языке) ISBN 978-99975-316-5-0.

12. Mekdaschi Studer, R. and Liniger, H. 2013. Water Harvesting: Guidelines to Good Practice. Centre for Development and Environment (CDE), Bern; Rainwater Harvesting Implementation Network (RAIN), Amsterdam; MetaMeta, Wageningen; The International Fund for Agricultural Development (IFAD), Rome. https://wocat.net/documents/85/WaterHarvesting_lowresolution.pdf

НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ И НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ОРОШЕНИЯ И ПЛАНОВОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Лытов М.Н.
Всероссийский научно-исследовательский институт
орошаемого земледелия – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова», г. Волгоград
E-mail: LytovMN@yandex.ru

Аннотация: Цель исследования – актуализировать научные подходы и принципы нормирования орошения с учетом всего спектра современной проблематики в системе планового водопользования. Исследованиями усовершенствована методика нормирования орошения с учетом агроэкологических ограничений, учитывающих, в том числе, технические характеристики мелиоративных объектов и уровень применяемых технологий орошения. Использование предложенного подхода позволяет оптимизировать структуру мелиорированных агроландшафтов с учетом гидрогеологических условий территории.

Ключевые слова: плановое водопользование, оросительные нормы, принципы нормирования, агроэкологические ограничения, технологии орошения

SCIENTIFIC APPROACHES AND NEW PRINCIPLES OF RATIONING IRRIGATION AND PLANNED WATER USE

Lytov M.N.
The All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture is a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov", Volgograd
E-mail: LytovMN@yandex.ru

Annotation: The purpose of the study is to update scientific approaches and principles of irrigation rationing, taking into account the full range of modern issues in the system of planned water use. Research has improved the methodology of irrigation rationing, taking into account agroecological constraints, taking into account, among other things, the technical characteristics of reclamation facilities and the level of irrigation technologies used. The use of the proposed approach makes it possible to optimize the structure of reclaimed agricultural landscapes, taking into account the hydrogeological conditions of the territory.

Keywords: planned water use, irrigation standards, principles of rationing, agroecological restrictions, irrigation technologies.

Принципы и механизмы рационального природопользования, основанные на биосферном подходе, - являются приоритетными инструментами в решения глобальных вызовов человечества [1, 2]. Оросительные мелиорации являются мощным фактором, обеспечивающим повышение продуктивности значительной части сельскохозяйственных земель. Мелиорации стали неотъемлемой частью системы обеспечения продовольственной безопасности и устойчивого производства продуктов питания [3, 4, 5]. В тоже время, необходимо обозначить, как минимум, две существенные проблемы, которые могут стать причиной негативной динамики. Это, во-первых, - значительные объемы использования пресной воды, и во-вторых, - существенная антропогенная нагрузка на орошаемые агроландшафты [6, 7]. Повышение точности планирования и практического осуществления режимов орошения является той задачей, решение которой позволит решить эти проблемы. Цель исследования – актуализировать научные подходы и принципы нормирования орошения с учетом всего спектра современной проблематики в системе планового водопользования.

Материалы и методы. В настоящее время водохозяйственные организации осуществляют планирование водоподачи на основании ГОСТ Р 58331.3-2019 «Водопотребность для орошения сельскохозяйственных культур». Стандарт содержит оросительные нормы (нетто, $м^3$/га) и укрупненные показатели водопотребности (брутто-поле, $м^3$/га) для лет с обеспеченностью осадками 50, 75 и 95 %.

Необходимость совершенствования методов нормирования орошения, определения биологически оптимальных оросительных норм и показателей водопотребности орошаемых сельскохозяйственных культур на юге Российской Федерации, определяется [8, 9, 10, 11]:

- усилением трендов аридизации климата, сценарными прогнозами глобального изменения климата, увеличением числа метеорологических явлений чрезвычайного характера, оказывающих влияние на водопотребление и биопродуктивность мелиорированных агроландшафтов;

- нормы в действующем стандарте приведены для крупных административных единиц без внутреннего деления по природным зонам, что может быть источником существенной ошибки при планировании водоподачи;

- нет полного охвата по группам сельскохозяйственных культур, получившим распространение и имеющих экономическое значение в регионе возделывания; используются недопустимые обобщения для культур, имеющих существенные различия по продолжительности поливного периода;

- используемая методология нормирования не учитывает водосберегающий потенциал современных гидромелиоративных технологий. В частности, капельное орошение позволяет существенно снижать потребление воды за счет сокращения доли увлажняемой площади поля.

Кроме того, современные подходы к нормированию орошения не должны ориентироваться исключительно на биологический оптимум орошаемых сельскохозяйственных культур. Необходимо соблюдать агроэкологические ограничения, которые определяются местными природным условиями мелиорированных агроландшафтов. Важно учитывать водоресурсный потенциал территории, особенно – в водо-дефицитных регионах. Следует понимать допустимый предел возможного регулирования оросительных норм в общей модели антропогенных нагрузок агроландшафта для сохранения его агроэкологической устойчивости. Материалами исследования являются концептуальные подходы, методология и методики нормирования водных нагрузок и орошения в мелиорированных агроландшафтах.

Результаты и обсуждение. В настоящее время методология нормирования орошения опирается на биологически оптимальные нормы орошения, которые определяются для лет различной влагообеспеченности. При этом влагообеспеченность рассматривается как статистическая характеристика климата, характеризующая вероятность достижения метеорологических показателей.

Одним из наиболее подходящих для современной практики критериев оценки оптимального мелиоративного режима и потребности в оросительных мелиорациях является радиационный индекс:

$$\bar{R} = \frac{R}{L \cdot P}, \quad (1)$$

где R – радиационный баланс поверхности почвы, кДж/см^2·год, L – скрытая теплота парообразования, $\frac{\text{кДж/см2·год}}{\text{мм}}$, P – атмосферные осадки, мм.

Значения индекса близки к единице ($\bar{R} \cong 1$) в зоне распространения наиболее плодородных почв степной зоны, которые обладают наибольшими запасами свободной энергии, аккумулированной в гумусе, высокой емкостью катионного обмена и водопрочной структурой. В пустынной зоне ($\bar{R} \geq 2$) биологическая продуктивность почв низка, органические остатки быстро минерализуются, в связи с чем почвы бедны гумусом и отличаются невысокой емкостью катионного обмена. При $\bar{R} \leq 0{,}8$ преобладают процессы вымывания минеральных и органических веществ из почвы. При орошении должно выполняться следующее условие: $\bar{R} = \frac{R}{L \cdot (P + M_r)} = 1$, где M_r – экологически допустимая величина водной нагрузки, мм/га. Отсюда $M_r \leq \frac{R}{L \cdot \bar{R}} - P$ [12], а учитывая, что $\bar{R} \cong 1$ получим:

$$M_r \leq \frac{R}{L} - P, \tag{2}$$

Для любого периода роста и развития орошаемых культур дефицит водопотребления можно определить, используя упрощенное уравнение водного баланса:

$$d_{wb} = ET_{crop} - W_a - P_{ef} - V_{gr}, \tag{3}$$

где ET_{crop} – суммарное водопотребление культуры за расчетный период, мм, W_a – активные запасы почвенной влаги, которые могут быть использованы растениями, мм, P_{ef} – эффективные атмосферные осадки за период, мм V_{gr}, – объем используемых грунтовых вод, мм.

Определение биологически оптимального (ориентированного на биологическую продуктивность) суммарного водопотребления орошаемых культур, может быть реализовано на основе биоклиматической модели вида [13]:

$$ET_{crop} = k_b k_0 ET_0, \tag{4}$$

где k_b – биоклиматический коэффициент, k_0 – микроклиматический коэффициент, ET_0 – потенциальная эвапотранспирация (испаряемость), мм/сут.

При этом, лежащая в основе, потенциальная эвапотранспирация, может быть определена по одной из многочисленных математических моделей, предложенных учеными в разных странах мира. В России наибольшее применение получила модифицированная формула Н.Н. Иванова:

$$ET_0 = k_t d_\varphi f(v)\,, \tag{5}$$

где d_φ – дефицит влажности воздуха, мб, k_t - энергетический фактор испарения, мм/мб, $f(v)$ - ветровая функция.

ФАО ООН в качестве стандарта для определения потенциальной эвапотранспирации использует модель Пенмана-Монтейта:

$$ET_0 = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{t+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34U_2)}, \quad (6)$$

где R_n – чистая радиация на поверхности растений, мДж/ м^2 в сут., G – плотность теплового потока почвы, мДж/м^2 в сут., t – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м, U_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м/с, e_s – давление пара насыщения, кПа, e_a – фактическое давление пара, кПа, e_s - e_a – дефицит давления пара насыщения, кПа, Δ уклон кривой давления пара, кПа/^{0}С, γ – психрометрическая постоянная, кПа/^{0}С.

В практике мелиоративного проектирования и эксплуатации одной из важных задач является определение параметров мелиоративного режима для заданного уровня влагообеспеченности. Для расчета климатически обеспеченных оросительных норм (вероятности не превышения) считаем целесообразным использовать медианное сглаживание по формуле Н.Н. Чегодаева:

$$p_m = \frac{m-0{,}3}{n+0{,}4} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где m – номер ранга, n – совокупное число значений в ранжированном ряду

Формула позволяет оценивать климатически обеспеченные оросительные нормы, обеспечивающие благоприятный водный режим почвы, наиболее соответствующий биологии возделываемой культуры. Однако, территория имеет ограниченные возможности по приему дополнительной (по отношению к зональному фону) водной нагрузки, которые определяются уровнем ее дренированности. Существующая классификация земель по степени дренированности включает количественные оценки оттока воды, которые могут быть использованы для определения предельной величины водной нагрузки [14].

При орошении объемы инфильтрационного питания грунтовых вод увеличиваются в сравнении с естественным зональным фоном. Однако, значимость ирригационного инфильтрационного стока существенно зависит от способа и применяемой технологии орошения, а также определяется конструктивными особенностями мелиоративной инфраструктуры. Суммарные потери оросительной воды на инфильтрацию не должны превышать оттока воды с учетом дренированности территории. При этом, необходимо учитывать зависимость инфильтрационных потерь от технологии орошения и конструктивных особенностей мелиоративной инфраструктуры:

$$Q_{\text{пр.уст.}} \cdot k_{\text{тп}} + Q_{\text{пр.уст.}} \cdot (1 - \text{КПД}_{\text{ОС}}) + Q_{\text{пр.уст.}} \cdot k_{\text{рс}} \leq k_c \cdot (Q_{\text{др.}} - Q_{\text{ф}}) \quad (8)$$

где $k_{\text{тп}}$ – коэффициент технических потерь воды для данной технологии орошения; $\text{КПД}_{\text{ОС}}$ - коэффициент полезного действия оросительной системы; $k_{\text{рс}}$ – коэффициент

потерь воды на фильтрацию из распределительных водоводов открытой оросительной сети; $Q_{\text{ф}}$ – фоновый (естественный) уровень инфильтрационного питания грунтовых вод, характерный для природной зоны, мм; $Q_{\text{др.}}$ – объемы годового оттока грунтовых вод для территории с известным уровнем дренированности, мм; k_c – коэффициент сезонности.

Тогда величина предельной водной нагрузки определится из соотношения, когда левая часть уравнения численно будет меньше либо равна правой части:

$$Q_{\text{пр.уст.}} = \frac{k_c \cdot (Q_{\text{др.}} - Q_{\text{ф}})}{(1 - \text{КПД}_{\text{ОС}}) + k_{\text{рс}} + k_{\text{тп}}} \quad (9)$$

Если числитель выражения (9) является природной характеристикой мелиорируемого объекта, то знаменатель характеризует уровень используемых мелиоративных технологий. Это тот потенциал, который позволяет существенно повысить устойчивость мелиорируемых агроландшафтов за счет инноваций и обновления (реконструкции) мелиоративной инфраструктуры.

Таким образом, условия биологического оптимума водопотребления орошаемых культур и экологические ограничения водных нагрузок на агроландшафты, - в неразрывной взаимосвязи формируют требования к режиму и технологии орошения. Наряду с этим, важно учитывать и другие ограничения в использовании водных ресурсов, которые могут быть существенны для определенных территорий или в зависимости от формата ведения агробизнеса. В частности, ограничения могут накладываться из-за дефицита пресной воды и необходимости решать задачу компромиссного водопользования. Еще одной, актуальной сегодня проблемой, является то, что маржинальность возделываемых в севообороте культур может существенно различаться. И определяется это не только видом культуры, но самой структурой построения агробизнеса в конкретном сельскохозяйственном предприятии. Сегодня часто хозяйства специализируются на производстве одного-двух видов продукции, для которых выстроена логистика и определены рынки сбыта. Прочие культуры используются для соблюдения севооборота и сохранения плодородия почвы. Они не имеют устойчивых рынков сбыта, и, как следствие, - существенно теряют в стоимости реализации произведенной продукции. Для таких культур важно максимально снизить производственные затраты, и уже во вторую очередь речь идет об урожайности и объемах производимой продукции. Экономически обоснованные оросительные нормы для таких культур тоже могут быть существенно снижены относительно биологически оптимального уровня.

Выводы. В настоящее время методология нормирования орошения опирается на биологически обоснованные оросительные нормы, которые определяются для лет

различной влагообеспеченности. При этом влагообеспеченность рассматривается как статистическая характеристика климата, характеризующая вероятность достижения метеорологических показателей. Исследованиями усовершенствована методика нормирования орошения с учетом агроэкологических ограничений, учитывающих, в том числе, технические характеристики мелиоративных объектов и уровень применяемых технологий орошения. Это позволяет оценивать инфильтрационные потери оросительной воды и нормировать водные нагрузки с учетом технического уровня и состояния мелиоративной инженерии, а также мелиоративных технологий. Использование предложенного подхода также позволяет оптимизировать структуру мелиорированных агроландшафтов с учетом гидрогеологических условий территории. Показано, что эти ограничения не являются исчерпывающими при решении задачи нормирования орошения. В частных случаях большое значение может иметь дефицит водных ресурсов, используемых для орошения или формат построения агробизнеса, определяющий маржинальность орошаемых культур.

Список литературы:

1. Винобер А.В. Биогеоценология и биосферное хозяйство // Биосферное хозяйство: теория и практика. - 2018. - № 5 (8). - С. 5-17.

2. Лытов М.Н. Биосферно-экологические принципы создания гидромелиоративных систем с функцией компенсации климатических рисков // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. - 2022. - № 3 (67). - С. 533-542.

3. Кленова Т.В. Роль орошаемого земледелия в решении задач продовольственного обеспечения населения страны // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. - 2025. - Т. 27. - № 3. - С. 97-111.

4. Овчинников А.С., Власов М.В., Куприянова С.В. Влияние мелиорации земель на минимизацию погодных флуктуаций и рост экономического эффекта сельскохозяйственного производства // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. - 2020. - № 1 (57). - С. 14-23.

5. Новиков А.Е., Дранников А.В. Прецизионные технологии орошения в повышении устойчивости земледелия к природным изменениям // Орошаемое земледелие. - 2024. - № 4 (47). - С. 45-50.

6. Yedilbayev N., Nurmukhametov N., Umarov S. Water supply in the agricultural sector of the central asian region: the need for radical transformation // Problems of AgriMarket. - 2025. - № 2. - С. 152-161.

7. Коломеец А.В., Каблуков О.В. Проблема водообеспечения и водосбережения в России // Вестник мелиоративной науки. - 2025. - № 4. - С. 135-146.

8. Дридигер В.К., Волошенкова Т.В., Антонов С.А., Гаджиумаров Р.Г., Оганян Л.Р., Перегудов С.В., Калашникова А.А. Прогноз и меры борьбы с засухой в восточных районах Ставропольского края // Земледелие. - 2025. - № 6. - С. 3-9.

9. Кониева Г.Н. Межгодовая изменчивость гидротермических условий в республике Калмыкия // Вестник мелиоративной науки. - 2024. - № 1. - С. 23-27.

10. Кирейчева Л.В. Основные направления снижения антропогенной нагрузки на водные объекты за счет уменьшения сброса дренажных вод с мелиорируемых территорий // Природообустройство. - 2015. - № 5. - С. 64-69.

11. Полетаев И.С., Летучий А.В., Губов В.И., Четвериков Ф.П. Теоретическое обоснование адаптации возделывания сельскохозяйственных культур к аридизации климата // Новые технологии. - 2025. - Т. 21. - № 4. - С. 194-205.

12. Айдаров И.П., Голованов А.И, Никольский Ю.Н. Оптимизация мелиоративных режимов орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель: рекомендации. – М.: Агропромиздат, 1990. – 60 с.

13. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: справочник / Под. ред. Б.Б. Шумакова. – М.: Колос, 199. – 432 с.

14. Сугаченко А.А., Гавриков Д.Е., Лопатовская О.Г. Оценка показателей естественной дренированности почв Предбайкалья для целей мелиорации // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. - 2014. - № 2 (14). - С. 15-24.

Климатические вызовы и адаптация

ПРЕЦИЗИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛИВАМИ ПО ТЕКУЩИМ АГРОМЕТЕОПАРАМЕТРАМ И НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Кирейчева Л.В.
ФНЦ «ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова» г. Москва
E-mail: kireychevalw@mail.ru

Аннотация: Предложена архитектура интеллектуальной оросительной системы нового типа и технологическая схема орошения, обеспечивающая автоматизированное управление поливами. Разработана технология и режим орошения физиологически обоснованными нормами поливов сельскохозяйственной культуры в режиме реального времени с учетом формирования агроклиматических факторов. Выполнено сопоставление результатов режима орошения по показаниям влажности почвы и расчетам по текущим метеопараметром.

Ключевые слова: «умное» орошение, управление, режим орошения, автоматизация, оросительные системы.

PRECISION IRRIGATION MANAGEMENT BASED ON CURRENT AGRI-METEOPARAMETERS AND SCIENTIFIC APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF AUTOMATED IRRIGATION SYSTEMS

Kireicheva L.V.
Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov" (FSC "VNIIGiM"), Moscow
E-mail: kireychevalw@mail.ru

Abstract: The architecture of a new-generation intelligent irrigation system and a technological scheme for irrigation that ensures automated control of watering are proposed. A technology and irrigation regime based on physiologically justified irrigation rates for crops in real-time, taking into account the formation of agroclimatic factors, have been developed. A comparison of the results of the irrigation regime based on soil moisture readings and calculations using current meteorological parameters has been carried out.

Keywords: smart irrigation, management, irrigation regime, automation, irrigation systems.

Введение. Современные тенденции развития оросительных мелиораций сводятся к переходу на малообъемные способы орошения; сочетанию разных способов орошения и мобильности смены способа орошения; специализации применительно к виду выращиваемых культур; компьютеризации в управлении оросительных систем, сборе и обработке информации; прецизионному орошению, как элемента точного земледелия и др.[1] Технологии прецизионного (точного) орошения являются эффективными методами адаптации систем к изменению агроклиматических и хозяйственных факторов и позволяют оценивать потребности культуры в воде в режиме реального времени, используя электронные системы и гидравлические элементы с высокой степенью полезного действия [2]. Переход к точному орошению требует использование цифровых технологий, различных датчиков, ГИС, спутниковой и метеорологической информации, широкого спектра средств автоматизации для полного и объективного контроля

поливами. Функционирующие в настоящее время оросительные системы не обладают полным спектром физических, аппаратных и программных средств. Поэтому для перехода на технологии точного орошения необходимо создание интегрированных систем управления, существенной доработки конструктивных элементов оросительных систем и применение методов искусственного интеллекта (ИИ). Выполненный обзор тенденций в мире по развитию орошения выявил нерешенные проблемы и направления будущих исследований. Наметились пути создания оросительных систем нового типа, обеспечивающие «умное» орошение; предложена общая структура интеллектуальной сельскохозяйственной системы; обсуждаются стратегии машинного обучения и получение доступных данных [3].

Методы исследования. Основываясь на современных представлениях и тенденциях, предложена интеллектуальная оросительная система, которая должна иметь комплекс взаимоувязанных гидротехнических сооружений и технологического оборудования, обеспечивающий гибкое распределение потоками оросительной воды и минеральных веществ по поливным модулям, автоматическое переключение с одного модуля на другой и точное управление поливами [4]. Интеллектуальные оросительные системы обеспечивают адаптивность при изменении природных и хозяйственных условий, то есть позволяют автоматически изменять свои параметры, алгоритмы работы или даже структуру для сохранения или достижения необходимого состояния при изменении внешних или внутренних условий сельскохозяйственного производства. Архитектура интеллектуальной оросительной системы должна обеспечить интеграцию физического уровня (оросительная инфраструктура, датчики, насосные станции и др.); цифрового уровня (модели, аналитика, алгоритмы управления); канала двусторонней связи между ними посредством комплекса взаимоувязанных гидротехнических сооружений и программного обеспечения (рис. 1).

Главная особенность таких систем орошения заключается в непрерывном цикле взаимодействия всех уровней: датчики собирают информацию из физической среды и передают в базу данных или мониторинг, вычислительные блоки обрабатывают информацию и принимают решения, а исполнительные механизмы воздействуют на физические процессы. Система оптимизирует свою работу за счет использования методов искусственного интеллекта (ИИ). В отличие от традиционных автоматизированных систем, где компьютеры просто встроены в оборудование, в системе создается неразрывная связь между цифровым и физическим миром.

Наиболее современным способом управления оросительных систем нового типа является цифровой двойник управления [5]. Цифровой двойник технологических и

управленческих процессов на основе моделей создает виртуальную копию системы с помощью математических и физических моделей. Программное обеспечение для реализации модели позволяет запустить виртуальную модель и провести анализ её работы. Цифровой двойник позволяет объединить экономико-математические модели управления водораспределением на системе, модели технической эксплуатации оросительной инфраструктуры, прогнозные модели на основе методов искусственного интеллекта, а также алгоритмы многокритериальной оптимизации, сценарного анализа и поддержки принятия решений в составе единого расчётного контура. Виртуальная копия постоянно «общается» с физическим объектом: получает от него данные и возвращает прогнозы, сценарии и подсказки для оператора.



Рис. 1 - Архитектура интеллектуальной оросительной системы нового типа

Цифровой двойник позволяет моделировать, анализировать и оптимизировать поведение реального объекта, процесса или системы в виртуальной среде; успешно адаптироваться к изменениям, улучшая управление сложными системами. Эффективность цифрового двойника напрямую зависит от качества и полноты данных, а также от точности математической модели. Технология требует интеграции с IoT-устройствами, системами управления и аналитическими платформами. Для этого необходимо создать единую информационную среду, которая позволит объединить данные из разных подсистем в одну базу или платформу. На основе этих данных модель анализирует состояние системы, выявляет узкие места, прогнозирует сценарии и даже может автоматически предлагать корректировки или частично брать управление на себя.

Рассматривая технологический процесс орошения, можно выделить 2 направления автоматизации управления оросительными системами: управление водораспределением на межхозяйственной оросительной системе, осуществляемое мелиоративными организациями Департамента мелиорации МСХ РФ, и управление поливами непосредственно на орошаемом поле, осуществляемое хозяйствами-потребителями (сельхозпроизводителями). Основная цель управления водораспределением на межхозяйственной оросительной системе оптимизировать подачу оросительной воды хозяйствам-потребителям в необходимом объеме в установленное время, в том числе и в условиях водного дефицита [6]. На внутрихозяйственной системе требуется обеспечить «умное» орошение в точном соответствии с эвапотранспирацией сельскохозяйственной культуры для получения заданной продуктивности. «Умное» орошение предполагает подачу воды в нужное время, в нужных количествах и даже в нужном месте на поле с использованием оросительной системы. Для этого выполняется расчет режима орошения. Большинство моделей расчетов режима орошения ориентируются на показатели влажности почвы с использование различных датчиков, которые часто выходят из строя, что затрудняет получение необходимых данных. При управлении поливами ключевой информацией для прогнозирования влажности почвы и роста и развития растений служат метеорологические данные, позволяющие лучше оценить сложную динамику пространственной влажности почвы, на которую, помимо осадков, влияют влажность и температура воздуха; наличие и уровень грунтовых вод; взаимное влияние различных участков поля, различных по гранулометрическому составу; величина капиллярного поднятия; инфильтрация и прочее.

Результаты и обсуждение. В ФНЦ «ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова» разработан программный модуль расчета режима орошения по текущим агрометеопараметрам и биоклиматическим коэффициентам культуры «ПРОМЕТ», основанный на модели водного баланса и реализованный в системе Microsoft Excel 2010 [7]. Метод водного баланса один из самых надёжных и широко применяемых в мелиоративной практике для установления режима орошения. Он даёт количественную оценку приходных и расходных статей водного баланса, который формирует влажность в корнеобитаемом слое почвы и позволяет точно рассчитать поливные нормы и сроки. В режиме реального времени рассчитывается эвапотранспирация по текущим метеоданным и биологическими коэффициентами, определяются сроки назначения полива. Норма полива рассчитывается как разница между требуемыми влагозапасами в расчетном слое почвы для конкретной культуры в данную фазу его развития и текущими

влагозапасами. Информация отображается в виде числовых значений и графиков полива и накапливается в базу данных за вегетационный период. Алгоритм расчета представлена на рис. 2.



Рис. 2 - Блок-схема программного модуля по расчету режима орошения по метеопараметрам

Биоклиматические коэффициенты связывают сумму температур или другие метеопараметры с реальным водопотреблением конкретной культуры и являются характерными не только для конкретной культуры и сорта, но и учитывают региональные условия.

Валидация модели осуществлялась на действующей мелиоративной системе на полигоне «Орошаемое» в филиале ВНИИОЗ ФНЦ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова». Для этого был выбран поливной модуль с применением дождевания на участке с выращиванием картофеля сорта Ред Скарлетт. Сотрудниками филиала осуществлялись режимы орошения по текущей влажности почвы, измеряемой с помощью датчиков влажности (отв. исп. к.с.-х.н К.А. Родин), а по программе ПРОМЕТ в режиме реального времени рассчитывались сроки и нормы полива по метеоданным автоматической станции «СОКОЛ-М1», расположенной непосредственно на рассматриваем поле. Метеостанция «Сокол-М1» обеспечивала стабильную передачу данных за счет

поддержки каналов связи GSM и ГЛОНАСС/GPS. Метеостанция транслировала информацию на сервер с помощью встроенного GSM-модема через SIM-карту. Она также имела возможность передавать данные по спутниковой связи Iridium, с помощью беспроводных технологий LoRa и Bluetooth, а также по кабелю. Программное обеспечение основывается на клиент-серверной сетевой технологии, что позволяло удаленным пользователям работать с метеорологическими данными с персонального компьютера.

Для расчета режима орошения были использованы данные агрофизических свойств почвы рассматриваемого участка, которые определялись в лаборатории филиала ВНИИОЗ и отдела ПиИТ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» (таблица 1).

Таблица 1 – Агрофизические свойства почвы на участке выращивания картофеля (данные ВНИИОЗ)

Слой, мм	ПВ	ППВ	МГ	Текущее значение (16.05.2025)	Плотность, г/см^3	Плотность твёрдой фазы, г/см^3
0-100	42,64	21,86	8,27	17,33	1,21	2,52
100-200	38,17	21,47	8,82	18,80	1,31	2,52
200-300	38,60	20,74	9,91	18,80	1,28	2,53
300-400	34,83	20,18	9,99	17,16	1,39	2,54
400-500	31,64	18,18	9,35	16,24	1,48	2,52
500-600	29,33	16,80	8,74	16,51	1,59	2,53

Примечание: ПВ – полная влагоемкость; ППВ – предельно-полевая влагоемкость; МГ – максимальная гигроскопичность; влажность почвы массовая, %

Биоклиматические коэффициенты картофеля сорта Ред Скарлетт по фазам развития были рассчитаны непосредственно для данного сорта картофеля и представлены в таблице 2.

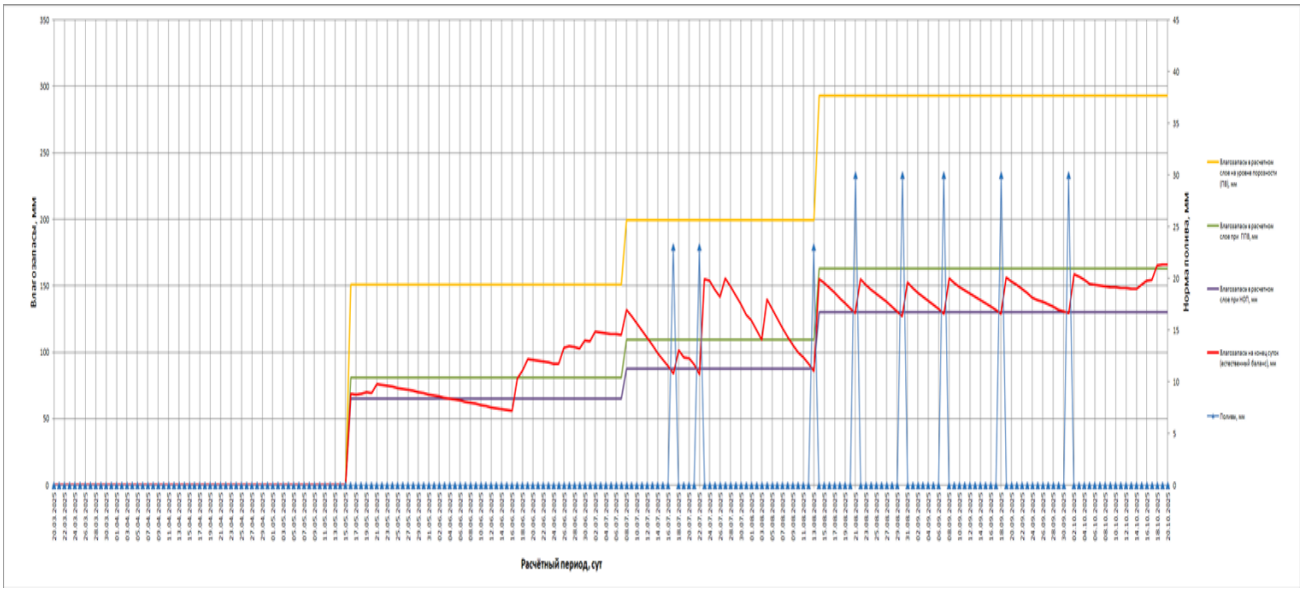
Таблица 2 – Биоклиматический коэффициент картофеля сорта Ред Скарлетт по фазам развития (данные ВНИИОЗ, 2025 г, Родин К.А.),

Фаза	К $_{бк}$, м^3/^{0}С	Дата наступления фазы	Глубина увлажнения, мм	Принятый полив на фазу, мм
До посадки/сева	0,37*	-	300*	-
Посадка-всходы	1,88	08.07.2025	400	23
Всходы – нарастание ботвы	2,77	22.07.2025	400	23
Нарастание ботвы-бутонизация	2,77	29.07.2025	400	23
Бутонизация – цветение	1,75	14.08.2025	600	30
Цветение – увядание ботвы	1,72	20.08.2025	600	30
Созревание	1,72	02.09.2025	600	30
Идёт созревание	1,72	23.09.2025	600	30
Увядание ботвы	0,37*	06.10.2025**	600	30
Уборка и после	0,37*	10.10.2025**	600	-

Примечания:
1) * – биоклиматический коэффициент и расчетный слой принят для вспаханного поля условно,
2) ** – дата уборки принята условно

На участке осуществлялся дифференцированный режим орошения с поддержанием влажности почвы не ниже 80% НВ в слое 0,4 м от посадки до бутонизации, а в остальной период в слое 0,6 м; влажность определялась с помощью почвенного влагомера «AQUATERR T-350».

Результатом работы программного комплекса представляются в табличной и графической форме. Расчетный режим орошения для 2025 года приведен на рис. 3.



Примечание: синим цветом указаны поливы; красным цветом – текущие влагозапасы

Рис. 3 - Расчетный режим орошения картофеля по программе ПРОМЕТ в графической форме (2025 год)

Выполнено сравнение расчетного и фактического режимов орошения. Конкретные даты и нормы проведения поливом по расчету по программному модулю и фактическим данным даны в таблице 3

Таблица 3 – Даты и нормы проведения поливов картофеля сорта Ред Скарлетт

№	Расчетные значения		Фактические данные	
	дата полива	поливная норма, мм	дата полива	поливная норма, мм
1	17.07.2025	23	12.07	23
2	22.07.2025	23	24.08	30
3	13.08.2025	23	27.08	30
4	21.08.2025	30	30.08	30
5	30.08.2025	30	02.09	30
6	07.09.2025	30	08.09	30
7	18.09.2025	30	12.09	30
8	01.10.2025	30	18.09	30
9	-	-	23.09	30
Всего	8 шт.	219	9 шт.	263

Примечание – Принятое начало поливного периода 10.07.2025, принятый конец поливного периода 06.10.2025

Как видно из таблицы 3, расчётный режим позволяет сократить количество поливов с 9 до 8 за счет более равномерного регулирования влажности в период вегетации в корнеобитаемом слое. При этом оросительная норма снижается на 20 % по сравнению с фактическими показателями. Сравнение расчетного режима орошения с фактическим на полигоне Орошаемое ВНИИОЗ представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетный и фактический режимы орошения картофеля сорта Ред Скарлетт

Показатель	Количество поливов	Оросительная норма, $м^3/га$	Урожайность, т/га	Затраты воды, $м^3/т$
Расчетные данные	8	2190	30,6	71,6
Фактические данные (Родин К.А.)	9	2630	30,0	87,7

Урожайность сохраняется на уровне фактических значений (30–30,6 т/га), а затраты воды на тонну продукции уменьшаются на 15 % (с 87,7 до 76,1 м³/). В целом, программный комплекс показал адекватную работу. Незначительная разница в режимах орошения связана с погрешностью определения влажности почвы влагомером и некоторой сдвижкой в сроках проведения поливов.

Указанный программный комплекс может встраиваться в автоматизированные системы управления поливами оросительной системы. Для управления подачей воды по внутрихозяйственной оросительной сети с различными поливными модулями разработана принципиальная схема автоматизации процесса орошения. В общую оросительную сеть интегрируется интеллектуальный контроллер (IoT), в который встраивается программный комплекс ПРОМЕТ. Контроллер анализирует данные, поступающие с метеостанции и датчиков, и принимает решения: нужно ли запускать полив, как долго он должен длиться, какой режим выбрать. На оросительной сети устанавливаются устройства, которые физически реализуют команды контроллера: электромагнитные клапаны, задвижки с гидроприводами, которые открывают и закрывают путь воде в конкретных зонах полива. Контроллер программирует длительность проведения полива, а электромагнитный клапан точно соблюдает временные интервалы, открывая и закрывая поток воды в том момент, когда необходим полив. Следует отметить, что современные решения должны включать элементы искусственного интеллекта и машинного обучения для более точного прогнозирования потребностей растений и оптимизации полива. Это обеспечивает проведение режима орошения в автоматизированном режиме и позволит получать урожаи, близкие к продукционному потенциалу, экономить водные ресурсы и снизить нагрузку на природный объект.

Заключение. Таким образом, переход к высокотехнологичным системам орошения строится на цифровизации: это целостная экосистема, где ИКТ (информационно-коммуникационные технологии) и IoT (Интернет вещей) работают в связке, чтобы сделать полив по-настоящему умным. Для расчета режима орошения предложен программный модуль, основанный на балансовом уравнении водного режима корнеобитаемого слоя и биоклиматических коэффициентах сельскохозяйственной культуры, который может быть встроен в интеллектуальный контроллер, обеспечивающий работу оросительной системы. Выполненная валидация программного комплекса показала, что комплекс в целом соответствует реальным потребностям пользователей.

Список литературы

1. Кирейчева Л.В. Научные подходы к созданию автоматизированных систем орошения нового типа. В книге: Повышение продуктивности мелиорированных земель России на основе цифровизации и агротехнологий нового поколения. Москва.- 2026.- С.117-126

2. Стратегия успешного развития мелиорации – прецизионное орошение / С. М. Васильев, А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский, В. Иг. Ольгаренко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2020. – № 3(39). – С. 1–22. – Режим доступа: http:www.rosniipm-sm.ru/article?n=1135. – DOI: 10.31774/2222-1816-2020-3-1-22.

3. `Del-Coco M., Leo M., Carcagnì P. «Machine Learning for Smart Irrigation in Agriculture: How Far along Are We?». Information, 2024 [Электронный ресурс]. -2024. - 15(6), 306. Режим доступа: https://doi.org/10.3390/info15060306].

4. Кирейчева Л. В., Рогачев Д. А., Лытов М. Н. Концептуальные положения создания высокотехнологичных систем орошения //Природообустройство №2. 2026г. С.6-15

5. Кирейчева Л.В., Рогачев Д.А., Хисматуллин М.М. Подходы к созданию цифрового двойника управления водопользованием //Вестник сельскохозяйственной науки. -2024.-№5.-С.58-64.

6. Рогачев Д.А. Цифровая технология управления водопользованием оросительных систем в экстремальных условиях// Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2025. № 4 (82). С. 532-544.

7. Технология прецизионного управления поливами по текущим агрометеопараметрам / Под редакцией доктора технических наук, профессора Л.В. Кирейчевой. – М.: ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова». 2026. 59 с.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЯ ГОДОВОГО И МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК В БАССЕЙНАХ БЕЛОГО И БАЛТИЙСКОГО МОРЕЙ

Курочкина Л.С., *Журавлев С.А.*
Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург
E-mail: kurochkina_liubov@hydrology.ru

Аннотация: На основе данных более 500 гидрологических постов с продолжительностью наблюдений не менее 60 лет выполнен анализ многолетней изменчивости годового и максимального стока рек в бассейнах Белого и Балтийского морей. Выявлена разнонаправленная динамика: рост годового стока на севере региона (+3...+5%/10 лет) и его снижение на юге Балтики (–2...–5%/10 лет); устойчивый рост зимних максимумов (+6...+8%/10 лет) на фоне снижения весеннего половодья (–3...–7%/10 лет) в южной и восточной частях Балтийского бассейна. Годовой максимум снижается на трети постов, преимущественно в южной Балтике. Изменение режима годового стока датируется 1978–1983 гг. для обоих морей, максимального стока — 1978–1989 гг. для Балтики и 1999–2007 гг. для Белого моря.

Ключевые слова: годовой сток, максимальный сток, многолетние тренды, Балтийское море, Белое море.

VARIABILITY AND CHANGES IN ANNUAL AND MAXIMUM RIVER RUNOFF IN THE BALTIC AND WHITE SEA BASINS

Kurochkina L.S., *Zhuravlev S.A.*
State Hydrological Institute, Saint Petersburg

Annotation: Based on data from more than 500 hydrological stations with observation records of at least 60 years, the long-term variability of annual and maximum river runoff in the basins of the White and Baltic Seas was analyzed. Contrasting trends were identified: annual runoff increased in the northern part of the region (+3 to +5% per decade) and decreased in the southern Baltic (−2 to −5% per decade), while winter maxima showed a consistent increase (+6 to +8% per decade) against a decline in spring flood peaks (−3 to −7% per decade) in the southern and eastern parts of the Baltic Sea basin. Annual maximum runoff decreased at one-third of the stations, predominantly in the southern Baltic. A shift in the annual runoff regime was identified in 1978–1983 for both seas, while changes in maximum runoff occurred in 1978–1989 in the Baltic Sea basin and in 1999–2007 in the White Sea basin.

Keywords: annual runoff, maximum runoff, long-term trends, Baltic Sea, White Sea.

Оценка многолетних изменений характеристик речного стока имеет важное значение для изучения современных изменений водных ресурсов и выявления региональных особенностей гидрологического режима. Для бассейнов Балтийского и Белого морей, где сток формирует соленость, стратификацию и ледовый режим акваторий, такие оценки особенно актуальны. Кроме того, такие оценки важны для обоснования проектов межбассейновой переброски стока. Изменения максимальных расходов воды отражают трансформацию процессов формирования экстремального стока, что критично для оценки рисков наводнений и функционирования водохозяйственных систем. Целью работы является оценка пространственно-временной изменчивости годового и максимального стока рек в бассейнах Белого и Балтийского

морей за период 1950–2024 гг., а также выявление основных особенностей его многолетних изменений.

Для анализа использованы данные наблюдений 508 гидрологических постов с продолжительностью наблюдений более 60 лет за период 1950–2024 гг. Рассматривались среднегодовые слои стока, максимальные слои весеннего половодья (февраль-июнь), летне-осенних паводков (июль-декабрь), сезонные и годовые максимумы. Расчет характеристик стока выполнен с использованием ежедневных данных (источники: гидрологические ежегодники, портал GRDC [1]). Для каждого поста выполнена оценка трендов (непараметрический тест Манна–Кендалла [2], метод Сена [3]), а также проведен анализ однородности рядов по критериям Стьюдента и Фишера и выделены точки перелома гидрологического режима с помощью тестов на нормальную однородность (SNHT) [4], непараметрического теста Петтитта ($p < 0,05$) [5] и теста Бьюшанда (по критическому значению U) [6].

Анализ однородности выявил существенные различия между характеристиками. Наиболее неоднородны ряды зимнего максимума: статистически значимые нарушения зафиксированы почти на половине постов по среднему (критерий Стьюдента) и более чем на половине по дисперсии (критерий Фишера). Весеннее половодье и годовой максимум демонстрируют умеренную неоднородность, при этом изменения проявляются как в средних значениях, так и в межгодовой изменчивости. Дождевой максимум, напротив, наиболее стабилен по средним значениям — неоднородность выявляется преимущественно тестом Фишера, что указывает на изменение характера колебаний при сохранении средней величины. Годовой сток неоднороден главным образом по среднему (треть постов), тогда как изменения дисперсии фиксируются реже (14% постов).

Пространственная структура трендов показана на рис. 1. Региональные средние значения трендов представлены в таблице 1.

Годовой сток растет в северных и восточных частях региона — в бассейнах Ботнического и Финского заливов, Ладожского, Онежского озер, озера Ильмень, а также в бассейне Белого моря, особенно в Онежской губе. Снижение характерно для юго-западной Балтики (Центральное Балтийское море, Гданьский залив). Наиболее выраженный контраст — между ростом зимних максимумов и снижением весеннего половодья (рис. 1б, в). Зимний максимум растет повсеместно: в Балтийском бассейне на половине постов, в Белом море — на 41% постов, с наибольшей интенсивностью в восточной части Финского залива и бассейнах крупных озер. Весеннее половодье, напротив, снижается в южной и восточной Балтике — в бассейнах Рижского, Нарвского,

Куршского заливов и озера Ильмень, тогда как в бассейне Белого моря изменения статистически незначимы.

Максимумы летне-осенних паводков демонстрируют смешанную картину: рост в бассейнах Финского и Ботнического заливов, Ладожского и Онежского озер; снижение в юго-западной Балтике. Годовой максимум, отражающий суммарный эффект сезонных изменений, снижается на трети постов Балтийского бассейна — преимущественно в южной и восточной частях, тогда как в бассейне Белого моря значимые тренды единичны.

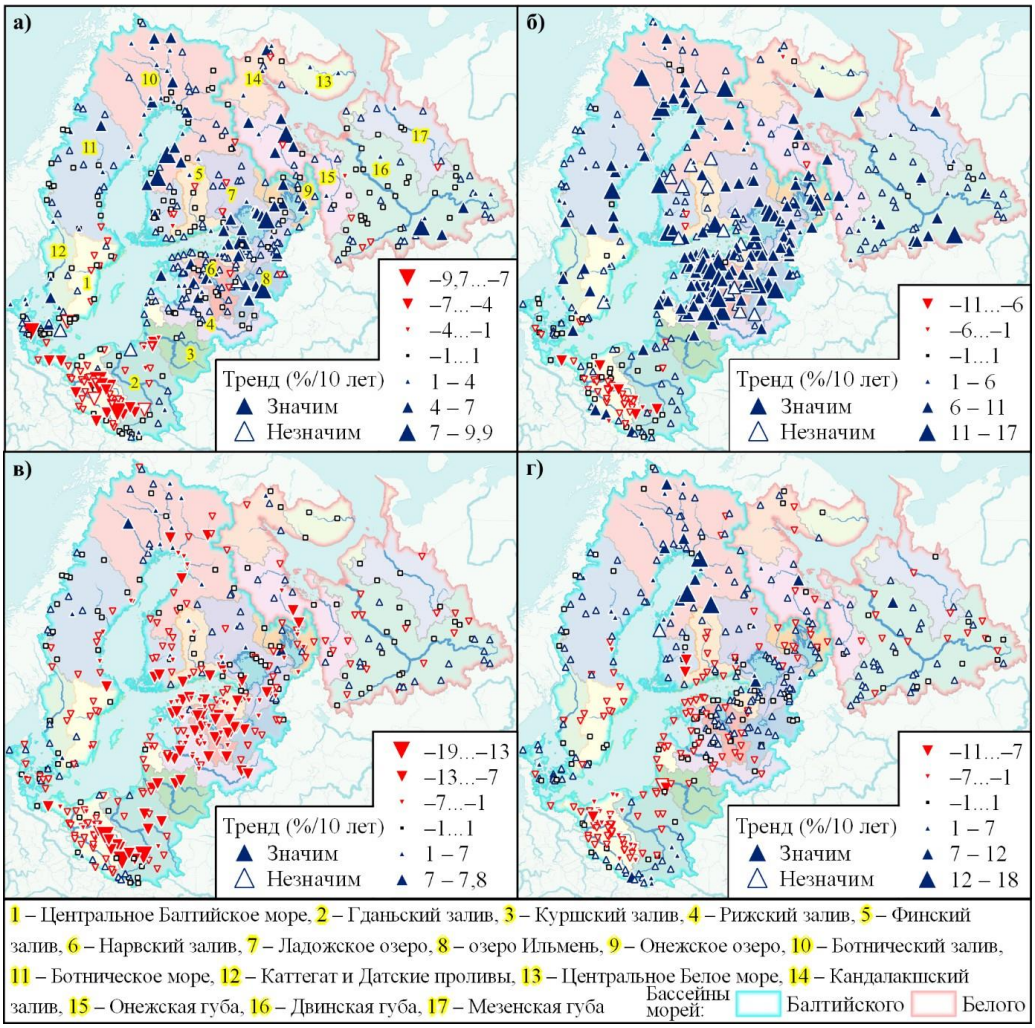


Рис. 1 - Тренды (%/10 лет) среднегодового стока (а); максимального стока за зимний сезон (б), весеннего половодья (в) и дождевых паводков (г) за многолетний период (1950–2024 гг.) по гидрологическим постам

Таблица 1 – Средние тренды стока (%/10 лет) по подбассейнам и характеристикам стока за период 1950–2024 гг.

Подбассейн	Тренды, %/10 лет								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Балтийское море	**+0,9**	**–2,9**	**+4,5**	**–0,0**	**–1,3**	**+0,6**	**–3,0**	**–2,7**	**–2,6**
Центральное Балтийское море	–1,7	–3,7	+0,4	–3,0	–3,8	–1,5	–4,4	–4,1	–4,2
Гданьский залив	–0,9	–3,3	+1,2	–2,3	–3,5	+1,0	–3,8	–2,4	–4,1

Подбассейн	Тренды, %/10 лет								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Куршский залив	+1,0	–7,3	+5,5	–2,4	–0,9	–3,4	–10,4	–4,8	–7,8
Финский залив	+2,4	–3,4	+7,3	+1,4	+0,3	+0,8	–3,6	–2,9	–2,5
Ладожское озеро	+2,7	–1,8	+7,4	+2,2	–0,3	+1,5	–1,8	–2,4	–1,1
озеро Ильмень	+2,4	–4,7	+8,9	+1,5	+1,0	+1,6	–5,0	–2,6	–3,6
Онежское озеро	+3,1	–1,3	+6,7	+1,9	–0,3	+0,0	–1,2	–2,0	–0,5
Нарвский залив	+1,7	–6,6	+8,0	+0,6	+1,2	+0,4	–7,0	–3,1	–5,4
Ботнический залив	+2,4	–0,2	+5,6	+2,7	–0,7	+4,3	+0,9	–0,5	+0,2
Ботническое море	+0,9	–1,6	+4,3	–0,4	–4,1	+1,4	–0,1	–2,1	–1,1
Рижский залив	+1,8	–5,9	+9,5	+1,0	+0,8	–0,6	–6,9	–4,5	–4,9
Каттегат и Датские проливы	+0,9	–0,5	+1,8	+0,3	+2,2	+1,4	–0,5	+1,4	–0,7
Белое море	**+1,3**	**–0,3**	**+4,1**	**+0,4**	**–3,2**	**+1,3**	**+0,1**	**–1,6**	**–0,5**
Двинская губа	+0,9	–0,0	+4,0	+0,2	–3,9	+1,6	+0,1	–1,7	–0,1
Онежская губа	+2,4	–1,5	+4,8	+1,6	–1,3	+1,3	–1,4	–3,0	–1,4
Кандалакшский залив	+1,5	+1,4	+2,2	–0,0	–1,6	–0,1	+3,9	+1,0	–1,2
Мезенская губа	+0,8	–0,7	+3,6	–1,5	–5,5	+0,0	–1,0	–0,9	–0,7
Центральное Белое море	+2,8	+0,9	+6,5	–0,2	–2,2	+1,6	+1,8	+0,8	+0,5

Примечание: 1 – среднегодовой сток; 2 – максимум весеннего половодья (фев.–июнь); 3 – зимний максимум; 4 – максимум летне-осенних паводков (июль–дек.); 5 – летний максимум (июнь–авг.); 6 – осенний максимум (сент.–нояб.); 7 – весенний максимум (март–май); 8 – максимум теплого периода (май–окт.); 9 – абсолютный годовой максимум;

Отдельного внимания заслуживает летний максимум (июнь–август). Его снижение лишь менее чем на треть пересекается по составу постов со снижением половодья и летне-осенних паводков, то есть отражает в основном самостоятельный сигнал, а не производную уже описанных трендов. Наиболее выражено оно в Центральном Балтийском (39% постов) и Ботническом (54% постов) морях, а также в бассейне Белого моря — в Двинской (32%) и Мезенской (50%) губах, где для годового максимума значимые тренды, напротив, единичны.

Точки перелома подчеркивают синхронность изменения режима. Для годового стока обоих морей доминирует период 1978–1983 гг., причем сдвиг наиболее выражен в Нарвском заливе (1978 г., 16 из 17 постов), Финском заливе (1978 г., 23 из 77), Рижском заливе (1978 г., 15 из 27) и Ладожском озере (1981 г., 13 из 39). Для максимального стока Балтики выделяются два периода: 1978–1983 гг. (зимний и осенний максимумы) и 1989 г. (годовой максимум); для весеннего половодья доминирующий сдвиг режима фиксируется раньше — в 1971–1972 гг. (вторичный, менее выраженный пик — в 1989 г.), а для дождевых максимумов согласованный год перелома распределён между 1978 г. и началом 2000-х гг. Для Белого моря отмечен более поздний сдвиг максимального стока — 1999–2007 гг.

Контраст между ростом зимних максимумов и снижением весеннего половодья свидетельствует об изменении сезонной структуры стока, связанной с сокращением

снегозапасов, более ранним снеготаянием и повышением зимних температур [7, 8]. Этот процесс может сопровождаться смещением вклада снегового стока в сторону дождевого и смешанного питания, особенно в восточной части Балтийского бассейна [7]. На юге Балтики динамика стока определяется опережающим ростом испарения, который компенсирует слабое увеличение осадков [7]. Пространственная неоднородность в бассейне Белого моря отражает как естественную изменчивость, так и разреженность наблюдательной сети.

Список литературы

1. GRDC (Global Runoff Data Centre) Data Portal [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://grdc.bafg.de/data/data_portal/ (дата обращения 08.09.2025)

2. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. — Econometrica, 1945, No. 13, pp. 245–259.

3. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. — Journal of the American Statistical Association, 1968, vol. 63, No. 324, pp. 1379–1389.

4. Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data. — Journal of climatology, 1986, vol. 6, No. 6, pp. 661–675.

5. 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, No. 2, pp. 126–135.

6. Buishand T. A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. — Journal of Hydrology, 1982, vol. 58, No. 1–2, pp. 11–27.

7. Meier H. M., Kniebusch M., Dieterich C., Gröger M., et al. Climate change in the Baltic Sea region: a summary. — Earth System Dynamics, 2022, vol. 13, No. 1, pp. 457–593.

8. Журавлев С. А., Бузмаков С. В., Курочкина Л. С., Шалашина Т. Л. Многолетняя изменчивость и тренды максимальных расходов воды весеннего половодья рек северо-запада Европейской России. — Метеорология и гидрология, 2017, № 6, с. 99–108.

ВЗАИМОВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНОВ РЕК ДНЕПР И ЗАПАДНАЯ ДВИНА В ПРЕДЕЛАХ БЕЛАРУСИ

Булак И.А., *Музыкин В.П., Русина А.О.*
РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», г. Минск, Беларусь
E-mail: omgwk@cricuwr.by

Аннотация: Приведены результаты исследования взаимовлияния поверхностных и подземных вод в условиях изменяющегося климата для территорий с наиболее нарушенным гидрологическим режимом поверхностных вод и гидродинамическим режимом подземных вод в бассейнах рек Днепр и Западная Двина на основании экспериментальных исследований, гидрологических, гидрогеологических и статистических расчетов.

Ключевые слова: Взаимовлияние, поверхностные воды, подземные воды.

INTERACTION BETWEEN GROUNDWATER AND SURFACE WATERS USING THE EXAMPLE OF THE DNIEPER AND WESTERN DVINA RIVER BASINS WITHIN BELARUS

Bulak I., *Muzykin V., Rusina A.*
RUE «Central Research Institute for Compex Use of Water Resources», Minsk, Belarus
E-mail: omgwk@cricuwr.by

Summary. The article presents the results of a study of the mutual influence of surface and groundwater in a changing climate for areas with the most disturbed hydrological regime of surface waters and the hydrodynamic regime of groundwater in the Dnieper and Western Dvina River basins based on experimental studies, hydrological, hydrogeological and statistical calculations.
Key words: Interaction, surface water, groundwater.

Поверхностные и подземные воды представляют собой единую природную систему, функционирование которой зависит от совокупности природных и антропогенных факторов. Актуальность исследований обусловлена необходимостью оценки изменения гидрологического режима поверхностных водных объектов за счет интенсивной добычи подземных вод на их водосборах, а также и решение обратной задачи, связанной с изменением гидрогеологического режима подземных вод за счет изменения гидрологического режима поверхностных вод, главным образом, обусловленного изменением климата.

Результаты исследований, представленные в настоящей статье, получены в 2025 году в рамках выполнения задания «Исследование взаимовлияния поверхностных и подземных вод в условиях изменяющегося климата» Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда», 2021-2025 годы.

Объектом исследования взаимовлияния поверхностных и подземных вод в пределах основных речных бассейнов Республики Беларусь выбраны бассейны рек Днепр и Западная Двина в связи с наличием территорий с интенсивным водоотбором подземных вод и наличием на этих территориях поверхностных водных объектов, на которые может быть оказано значимое влияние данного водоотбора.

Установление зависимостей взаимовлияния поверхностных и подземных вод в бассейнах рек Днепр и Западная Двина основано на оценке тенденций изменения речного стока и гидродинамического режима по данным мониторинга поверхностных и подземных вод, а также экспериментальных исследований.

Анализ тенденций изменения речного стока за период 1989-2025 гг. по результатам сравнения средних величин за данные периоды в бассейнах рек Днепр и Западная Двина как в годовом разрезе, так и в разрезе сезонов года и помесячно выявил значимые изменения стока, которые в большинстве случаев свидетельствуют об уменьшении речного стока. Уменьшение речного стока характерно как для рек Днепр и Западная Двина, так и для других средних и малых рек в бассейне. Наибольшее

уменьшение речного стока выявлено в летний и осенний периоды года (максимально в июле), также значимое уменьшение стока большинства изучаемых рек произошло и в остальные периоды года как в месячном, так и в сезонном разрезе. Наименьшее уменьшение речного стока выявлено в зимний период, а за месяц май практически по всем рекам намечается небольшая тенденция увеличения стока, что обусловлено влиянием изменения климата на речной сток, более ранним наступлением весеннего половодья, а в последние годы, зачастую, с его слабой выраженностью или отсутствием.

Исходя из целевой направленности изучения гидродинамического режима подземных вод в бассейнах рек Днепр и Западная Двина и оценки взаимовлияния поверхностных и подземных вод, в качестве ключевых объектов исследований приняты следующие (рис. 1 и 2):

- участок водозабора подземных вод Сож, эксплуатируемый для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Гомель с 1988 г., в зону возможного влияния которого попадают река Спонка, а также реки Сож и Ипуть;

- участок водозабора подземных вод Зимница, эксплуатируемый для централизованного водоснабжения г. Могилев с 1968 г., в зону возможного влияния которого попадают реки Вильчанка, Щетинка, а также река Днепр;

- участок водозабора подземных вод Лучеса, эксплуатируемый для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Витебск с 1978 г., в зону возможного влияния которого попадает река Лучеса;

- участок водозабора Окунево, эксплуатируемый для централизованного водоснабжения г. Новополоцк с 1991 г., в зону возможного влияния которого попадают реки Ушача и Нежлевка.

Расчетные гидрологические характеристики минимального и годового стока в створах ключевых объектов исследований поверхностных вод определены с использованием СП 3.04.03-2026 «Правила расчета гидрологических характеристик» [1].

Для оценки формирования режима подземных вод в пределах исследуемой территории в условиях взаимовлияния с поверхностными водами, был использован метод сравнительного гидрогеологического анализа с элементами математической статистики [2].

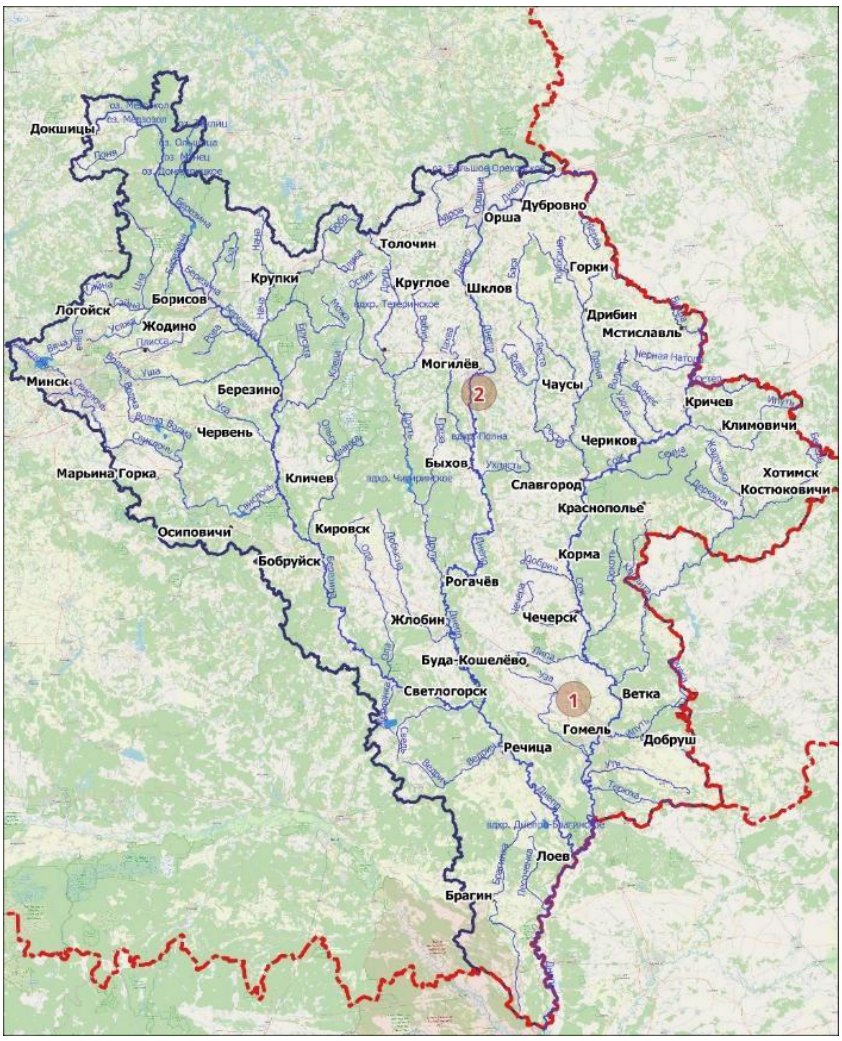


Рис.1 – Схема ключевых объектов исследования в бассейне реки Днепр

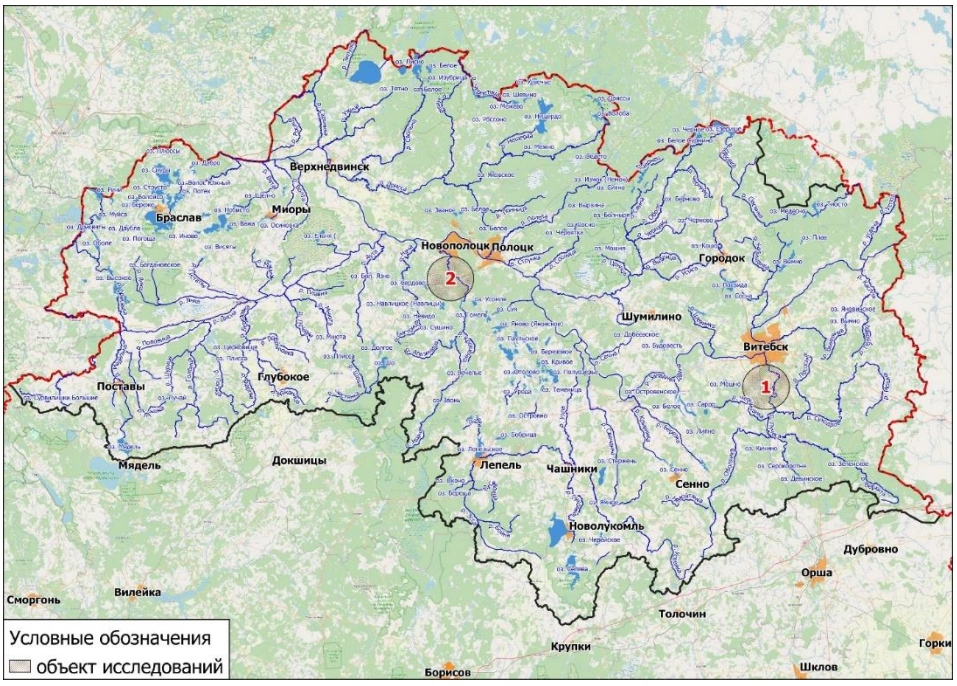


Рис. 2 – Схема ключевых объектов исследования в бассейне реки Западная Двина

Закономерности многолетних колебаний уровней подземных вод оценены относительно изменений колебаний поверхностных и подземных вод на участках постов и статистически оценены по следующим направлениям:

- использование многолетних (за 1989-2024 гг.) среднемесячных данных изменения уровней воды в реках, уровней УГВ и УНВ на участках гидрогеологических постов и режимных сетей, и построение на их основе графиков разностных интегральных кривых;

- выделение ритмичности хода уровней поверхностных и подземных вод в многолетнем разрезе и построение графиков модульных коэффициентов.

Существует определенная природная взаимосвязь условий формирования многолетнего и сезонного режимов речного стока и гидродинамического режима подземных вод в ключевых участках бассейнов рек Днепр и Сож, в том числе:

- режимы рек Днепр и Сож и их притоков-средних рек (Березина, Ипуть и другие) характеризуются синхронной ритмичностью хода уровней воды, продолжительностью от 3-5 до 11-12 лет, но в современных условиях с 2013 г. осуществляется устойчивое падение уровней воды в реках ниже среднемноголетних норм, что может быть связано с солнечной активностью;

- в поймах рек больших и средних рек многолетние колебания уровней грунтовых вод естественного формирования являются синхронными режимам речных вод и также характеризуются ритмичностью хода уровней, продолжительностью от 3-5 до 11-12 лет, что может быть связано с солнечной активностью, для напорных вод, формируемых в пределах этих же участков, с глубиной их залегания ритмичность затухает;

- режимы малых рек бассейнов рек Днепр и Сож являются асинхронными по отношению к их режимам, отличаются отрицательной динамикой уровней и противоположными значениями экстремумов интегральных кривых, что, очевидно, указывает на наличие (преобладание) техногенных факторов и, прежде всего, мелиоративного осушения земель.

- на водосборах рек бассейнов рек Днепр и Сож многолетние колебания уровней грунтовых и напорных вод естественного формирования, как правило, являются асинхронными (или переходного типа к синхронному) режимам речных вод и грунтовых вод пойм, данная асинхронность может быть выражаться в затрудненных условиях их взаимовлияния и главенствующей роли атмосферного питания для рек;

- в многолетнем разрезе наблюдений (1989-2024 гг.) режимы грунтовых и напорных вод на участках гидрогеологических постов характеризовались колебаниями уровней в среднем выше или на уровне среднемноголетних норм, но с 2013 г. отмечается

цикл общего спада уровней и напоров подземных вод ниже данных норм, продолжающийся до настоящего времени.

В бассейне реки Западная Двина можно выделить следующие закономерности взаимовлияния поверхностных и подземных вод:

- режимы реки Западная Двина и ее притоков характеризуются синхронной природной ритмичностью хода уровней воды, продолжительностью от 3-5 до 11-12 лет, что может быть связано с солнечной активностью;

- для современных условий общей тенденцией для рек бассейна Западной Двины является устойчивое падение фактических уровней воды ниже среднемноголетних значений, начиная с 2013 г., что соответствует формированию маловодной фазы колебаний уровней воды. Подобный спад уровней воды свойственен и для верховьев крупных и средних рек (например Западная Двина-Сураж);

- в поймах реки Западная Двина и ее притоков многолетние колебания уровней грунтовых вод естественного формирования являются синхронными режимам речных вод и также характеризуются ритмичностью хода уровней, продолжительностью от 3-5 до 11-12 лет, для напорных вод, формируемых в пределах этих же участков, с глубиной их залегания ритмичность затухает;

- в многолетнем разрезе наблюдений (1989-2023 гг.) режимы грунтовых и напорных вод на участках гидрогеологических постов характеризовались колебаниями уровней в среднем выше или на уровне среднемноголетних норм, но с 2013 г. также отмечается цикл общего спада уровней и напоров подземных вод ниже данных норм, продолжающийся до настоящего времени.

- многолетние и сезонные колебания уровней грунтовых и напорных вод на участках интенсивного отбора подземных вод на водозаборах Окунево и Лучеса также имеют общие сходные гидродинамические закономерности, но уже, главным образом, обусловленные техногенными факторами;

- наиболее выражена связь с природными факторами в режимах грунтовых и напорных вод на участке водозабора Лучеса, где природные режимообразующие факторы занимают главенствующее положение.

Воздействие водозаборов подземных вод, рассчитанное по методикам оценки сокращения речного стока, указывает на возможные существенные потери стока рек в бассейне реки Днепр. Например, коэффициент потерь речного стока в реках при отборе подземных вод за счет уменьшения подземного питания рек для существенного числа действующих водозаборов уже в настоящее время составляет от 0,5 и более (водозаборы

гг. Речица, Костюковичи, Горки и другие) до >1,0 (водозаборы гг. Минск, Бобруйск, Могилев, Орша, Гомель, Миоры, Буда Кошелево, Корма и другие) и к 2035 году воздействие на речной сток только будет увеличиваться, что отразится явно в негативной степени на меженные стоки рек, протекающих в районе данных городов.

Результаты выполненных расчетов показывают, что по состоянию на 2025 год с наиболее выраженным негативным воздействием на речной сток и с превышением допустимого расхода поверхностных вод, не подлежащего изъятию из поверхностного водного объекта, осуществляется эксплуатация только водозабора подземных вод Дражня (г. Минск). Уточненный расчетный коэффициент потерь речного стока реки Дражня относительно минимального среднемесячного летне-осеннего стока 95% обеспеченности при отборе подземных вод на водозаборе Дражня уже для современных условий составил >1. Все другие водозаборы в современных условиях водоотбора и на перспективу до 2035 г. оказывают и будут оказывать существенно меньшее воздействие на поверхностные водные объекты.

Разработка прогнозных карт речного стока для территорий с наиболее нарушенным гидрологическим и гидродинамическим режимом в бассейне реки Днепр осуществлялась с использованием результатов прогноза климата и стока для бассейна реки Днепр, выполненного в 2011-2014 гг. и представленного в соответствующей монографии [3], а также уточнения указанного прогноза с использованием более современных прогностических моделей.

По результатам прогноза речного стока в среднем по бассейну реки Днепр можно сделать заключение о прогнозном уменьшении речного стока – в среднем по бассейну его уменьшение в годовом разрезе может составить 5,2%, в весенний – 4,3%, в летний – 12,1%, в осенний – на 8,5%. В зимний период прогнозируется увеличение речного стока на 4,3% (рис. 3).

По результатам прогноза речного стока в среднем по бассейну реки Западная Двина можно сделать заключение о прогнозном увеличении речного стока – в среднем по бассейну его увеличение в годовом разрезе может составить 4,5%, в зимний период – на 9,8%, в весенний – на 7,8%, в летний – на 9,1%, в осенний – на 1,2% (рисунок 4).

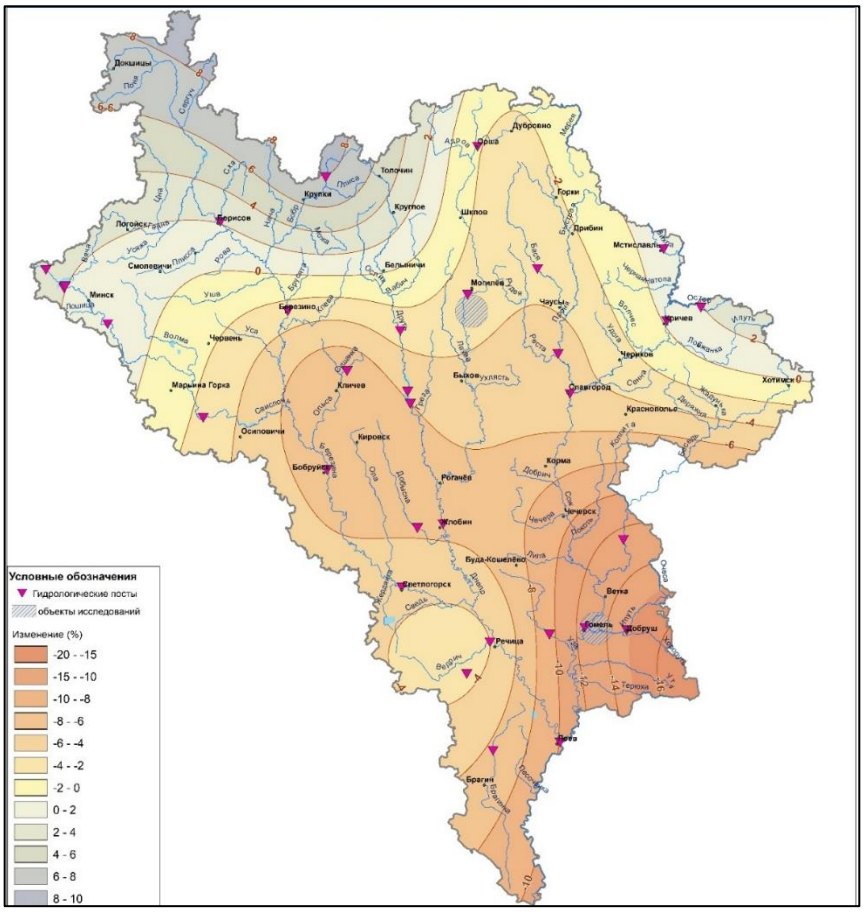


Рис. 3 – Карта–схема прогноза речного стока (годовой сток) в бассейне реки Днепр

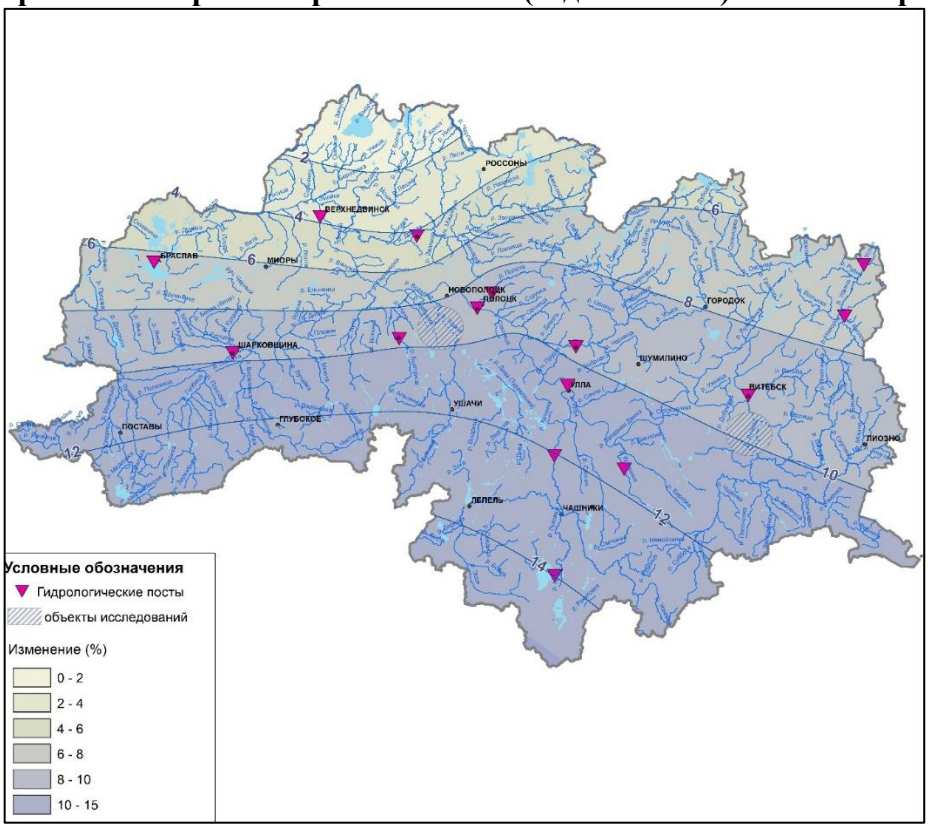


Рис. 4 – Карта–схема прогноза речного стока (годовой сток) в бассейне реки Западная Двина

Результаты прогноза речного стока и гидродинамического режима подземных вод с учетом взаимовлияния поверхностных и подземных вод позволили для территорий с наиболее нарушенным гидрологическим и гидродинамическим режимом в бассейнах рек Днепр и Западная Двина разработать рекомендации по рациональному использованию и охране поверхностных и подземных вод, а также сформулировать научно-обоснованные предложения по оптимизации систем мониторинга поверхностных и подземных вод по количественным параметрам в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь.

Список литературы

1. СП 3.04.03-2026 «Правила расчета гидрологических характеристик». – Введ. 20.03.2026. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2026. – 185 с.

2. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л., Гидрометеоиздат, 1974.

3. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата/ под общей редакцией А.А.Волчека, В.Н.Корнеева. – Брест: Альтернатива, 2017. – 228 с.

МНОГОЦЕЛЕВОЙ САМОТЕЧНЫЙ КАНАЛ «ВОЛГОГРАДСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ – Р. АХТУБА» ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА НИЖНЕЙ ВОЛГИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МЕЛИОРАЦИИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОГО РЕГИОНА И ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДОЙ

Бубер А.Л. **,** *Бубер А.А., Талызов А.А., Жезмер В.Б.*
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», Москва
buber49@yandex.ru

Аннотация. В статье предложен проект многоцелевого самотечного канала, соединяющего Волгоградское водохранилище и р. Ахтуба. Основная цель строительства канала – возродить ценные промысловые породы рыб, обеспечив их заход и нерест в верховьях Волгоградского водохранилища, обеспечить объекты мелиорации водой и дешевой электроэнергией, обводнить Волго-Ахтубинскую пойму и Дельту Волги, улучшить экологическую обстановку региона. В статье приведен расчет ориентировочной стоимости канала и ожидаемый экономический эффект.

Ключевые слова*:* Волгоградское водохранилище, Канал, Нерест, Мелиорация, Деривационная ГЭС

MULTIPURPOSE GRAVITY CANAL «VOLGOGRAD RESERVOIR - AKHTUBA RIVER» FOR THE RESTORATION OF THE LOWER VOLGA FISHERIES AND THE PROVISION OF IRRIGATION WATER TO THE LAND RECLAMATION FACILITIES OF THE VOLGA-AKHTUBA REGION AND THE VOLGA DELTA

Buber A.Л.*, *Buber A.A., Talyzov A.A., Zhezmer V.B.
Federal Research Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow
Email: buber49@yandex.ru

Abstract: The article proposes a design for a multi-purpose gravity canal connecting the Volgograd Reservoir and the Akhtuba River. The primary goals of the canal's construction are to restore valuable commercial fish species by facilitating their migration and spawning in the upper reaches of the Volgograd Reservoir, provide land reclamation facilities with water and cheap electricity, flooding the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga Delta, and improve the region's environmental conditions. The article provides a calculation of the estimated cost of the channel and the expected economic effect.

Keywords: *Volgograd Reservoir, Canal, Spawning, Irrigation, Diversion Hydroelectric Power Station*

Введение

Для сохранения поголовья ценной Волго-Каспийской рыбы в построенную в 60-х годах прошлого века плотину Волжской ГЭС был вмонтирован рыбоподъёмник уникальной конструкции. Рыбоподъемник был запущен в 1961 году и позволил транспортировать в верхний бьеф Волгоградского водохранилища около 700 рыб различных видов в день. Производительность рыбоподъёмника должна была составить от 20 до 30 тысяч осетровых особей в год, за счет чего обеспечивалось сохранение поголовья осетровых рыб, которые раньше нерестились в районе Саратова и выше по течению.

После строительства Нижневолжских водохранилищ условия нереста значительно ухудшились из-за новых гидрологических условий. В конце 70-х начале 80-х годов прошлого века Институтом биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина радиоактивными методами были проведены исследования поведения осетровых в верхним бьефе Волгоградского водохранилища после того, как они покидали рыбоподъемник. Выяснилось, что две трети особей оглушенные «скатывались» через турбины ГЭС назад в нижний бьеф и только одна треть уходила на нерест. Причиной такого поведения была малая скорость течения воды у плотины, которая для осетровых рыб при нересте должна составлять 0,3 - 0,6 м/с. Эти исследования показали неэффективность самой идеи транспортировать осетровых рыб в верхний бьеф при помощи рыбоподъемника. По этой причине значительно сократилось поголовье различного вида рыб, особенно осетровых, которые раньше шли на нерест в Волгоградское водохранилище. В конце 80-х годов ситуация привела к истощению рыбного стада. К 1995 году осетровые перестали подходить к плотине Волжской ГЭС, рыбоподъёмник был официально законсервирован и не работает в проектном режиме до настоящего времени.

В связи с истощением р. Ахтуба в 2015 году Институтом водных проблем РАН, а позднее Гидропроектом, были предложены различные проекты обводнительного канала

из верхнего бьефа (ВБ) Волгоградского водохранилища в р. Ахтуба различной конфигурации и производительности: от 100 м^3/с (ИВП РАН) до 1000 м^3/с (Гидропроект). Однако предложенные варианты не позволяют выполнять рыбохозяйственные функции. В представленных исследованиях предложен вариант самотечного многоцелевого канала «Волгоградское водохранилище – р. Ахтуба», который, по мнению авторов, позволит обводнить р. Ахтуба, восстановить поголовье ценной волжской рыбы, обеспечить объекты мелиорации Волго-Ахтубинского региона и Дельты Волги оросительной водой, установить низконапорную деривационную ГЭС, оживить функционирование маломерного флота на р. Ахтуба, улучшить экологическую обстановку Нижней Волги. Наличие дешевой электроэнергии позволит возродить мелиорацию на орошаемых землях, расположенных на Волго-Ахтубинском плато (между Волгоградским водохранилищем, р. Торгун и р. Ахтуба) и в Дельте Волги.

Материалы и методы исследования

Для обоснования основных параметров предлагаемого многоцелевого самотечного канала «Волгоградское водохранилище – р. Ахтуба» (далее Канал) были выполнены следующие исследования:

1. Разработана гидродинамическая модель (ГДМ) Волгоградского водохранилища (ВГУ), позволяющая определить в каждом расчетном створе расходы, уровни и скорости течения в период нереста.

2. На основе анализа цифровой модели рельефа выбрано наилучшее плановое положение в отношении высотных отметок трассы Магистрального канала (МК), как основного элемента проектируемого Канала, и трассы деривационной ветки (ДК), на которой планируется построить деривационную ГЭС.

3. Разработана ГДМ Канала.

4. Выполнен расчет по двум моделям: ГДМ ВГУ и ГДМ Канала, получены основные гидравлические параметры потока при различных вариантах отметок в голове Канала.

5. Выполнен расчет ориентировочной стоимости земляных работ при строительстве Канала, определена предельная стоимости работ по строительству деривационной ГЭС на канале.

6. Рассчитан ожидаемый годовой экономический эффект при условии выполнения всех проектируемых многоцелевых условий функционирования Канала.

Гидродинамическая модель Волгоградского водохранилища

Целью разработки ГДМ ВГУ является определение во всех створах основных гидродинамических параметров (уровней, расходов и скоростей) при прохождении

половодной волны, в период которой происходит нерест основных видов рыб. ГДМ позволяет найти головную точку Канала по трассе водохранилища, в которой скорости течения будут превышать 0,3 м/с - это условие является минимальным, при котором рыба идет на нерест. ГДМ ВГУ разработана для участка: Нижний бьеф (НБ) Саратовского водохранилища, верхний бьеф (ВБ) Волгоградского водохранилища. Модель откалибрована по ретроспективным данным наблюдения с 1999 по 2021 год, с учетом статических объемов Волгоградского водохранилища, приведенных в Основных правилах использования водных ресурсов Волгоградского водохранилища на реке Волге (ПИВР) [*1 Основные правила использования водных ресурсов Волгоградского водохранилища на реке Волге (шифр РВ-261-83, утверждены приказом Министерства мелиорации и водного хозяйства РСФСР № 596 от 11 ноября 1983 года.].

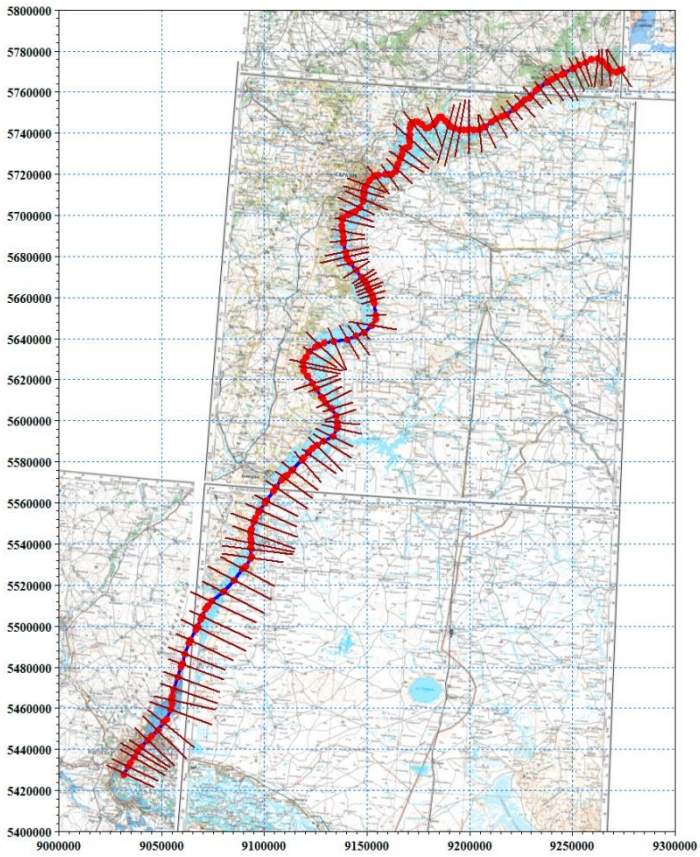


Рис. 1 – Трасса ГДМ Волгоградского водохранилища

Трасса ГДМ Волгоградского водохранилища составляет 529,5 км, поперечные сечения построены по руслу и пойме водохранилища с шагом 5 км (рис.1). Граничные условия: в нулевом створе – приточность к Волгоградскому водохранилищу (сброс с Саратовского ГУ); боковая приточность; в концевом створе - уровень воды в ВБ Волжской ГЭС.

В таблице 1 приведено сравнение полных объемов воды при работе водохранилища в статическом режиме по ПИВР и полученных расчетным путем на ГДМ ВГУ.

Таблица 1 – Сравнение наблюденных и расчетных объемов водохранилища при различных уровнях верхнего бьефа

Уровень ВБ, м	Объем наблюденный (ПИВР), км^3	Объем расчетный, км^3	Погрешность, км^3
12.00	23.20	23.24	-0.04
13.00	25.73	25.85	-0.12
14.00	28.47	28.70	-0.23
15.00	31.45	31.81	-0.36
16.00	34.71	34.95	-0.24

Статистическое обоснование адекватности ГДМ проводилось на основе сравнения посуточных наблюденных данных с результатами расчета на ГДМ уровня воды в ВБ ВГУ за период 2015-2020 гг. (таблица 2). ГДМ Волгоградского водохранилища работает адекватно и может быть использована для выполнения гидродинамических расчетов (NSE ≥ 0,80) [1 Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока. // Гидрологические исследования и прогнозы. № 1 (375). 2020. С. 176–189].

Выбор планового положения Магистрального канала

На основе анализа цифровой модели рельефа выбрано наилучшее плановое положение в отношении высотных отметок трассы проектируемого Канала, включая деривационную ветку, на которой планируется построить деривационную ГЭС. Были рассмотрены различные варианты планового положения трассы Магистрального канала (МК), включая трассу, предложенную АО Гидропроект в 2020 году [Комплекс гидротехнических сооружений, обеспечивающий дополнительное обводнение Волго Ахтубинской поймы. Предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду (2082-ОВОС) Государственный контракт №1575/19 от 25.06.2019].

Таблица 2 – Статистическая обработка результатов моделирования

Параметр	Расшифровка	2015	2016	2017	2018	2019	2020
NSE	Коэффициент Нэша-Сатклиффа	0.92	0.99	0.97	0.93	0.95	0.98
MSE	Среднеквадратическая ошибка, м	0.05	0.04	0.05	0.14	0.07	0.05
MAE	Средняя абсолютная ошибка, м	0.19	0.14	0.17	0.27	0.19	0.16
RMSE	Квадратный корень из среднеквадратичной ошибки, м	0.23	0.20	0.23	0.38	0.26	0.22
Коррел.	Корреляция	0.98	1.00	0.99	0.97	0.98	0.99
R^2	Коэффициент детерминации	0.93	0.99	0.97	0.94	0.95	0.98

Рассмотренные варианты МК в плане приведены на рисунке 2. В результате анализа продольных профилей рассмотренных трасс был выбран МК «пос. Рыбный – р. Ахтуба» (вариант 2), который в наибольшей степени соответствует поставленной цели. На рис. 3 приведен продольный профиль рельефа земной поверхности по МК.



Рис. 2 – Варианты трассы канала: 1 - предложенный АО Гидропроект, 2 - МК пос. Рыбный – р. Ахтуба ниже Ленинска, Волгоградское вдхр., 3 - из залива р. Торгун

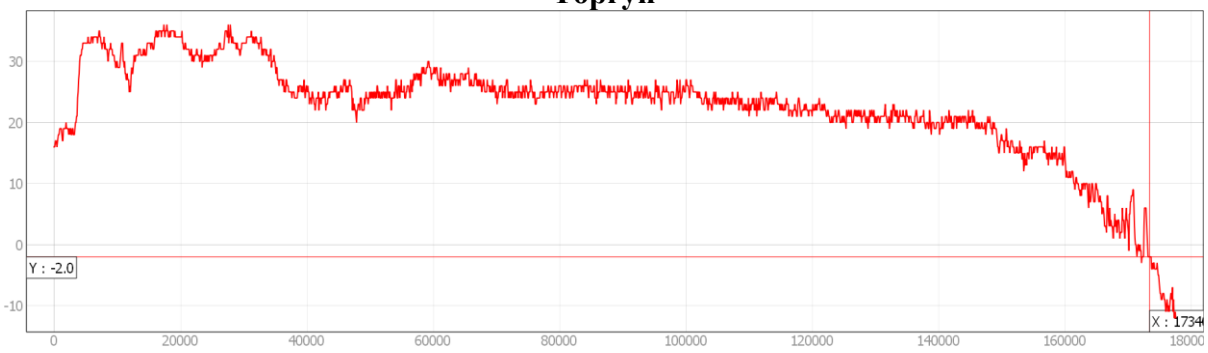


Рис. 3 – Продольный профиль рельефа земной поверхности по МК

Гидродинамическая модель Канала

Трасса гидродинамической модели Канала состоит из двух водотоков: Магистральный канал, обеспечивающий основные потребности возникающей водохозяйственной системы, и деривационный канал, предназначенный для установки деривационной ГЭС.

Протяженность магистрального канала до впадения в р. Ахтуба составляет 170 км. На 92,8 км от головы Магистрального канал (МК) отходит ветвь Деривационного

канала (ДК) протяженностью 75,4 км, которая также впадает в р. Ахтуба. Поперечные сечения модели построены по руслу и пойме проектируемого Канала и р. Ахтуба с шагом около 10 км. Глубина МК зависит от уровня ВБ Волгоградского водохранилища. При отметке ВБ 15 м глубина в голове МК (створ 0) составляет 4,5 м и 2 м в точке сопряжения с р. Ахтуба (175 км), в ДК глубина по всей длине канала составляет 2 м. Ширина по дну МК составляет 145 м, ДК – 105 м. Заложение откосов в МК составляет 1:3,5, в ДК – 1:1,5. Трасса Канала и поперечные сечения в характерных створах приведены на рис. 4.

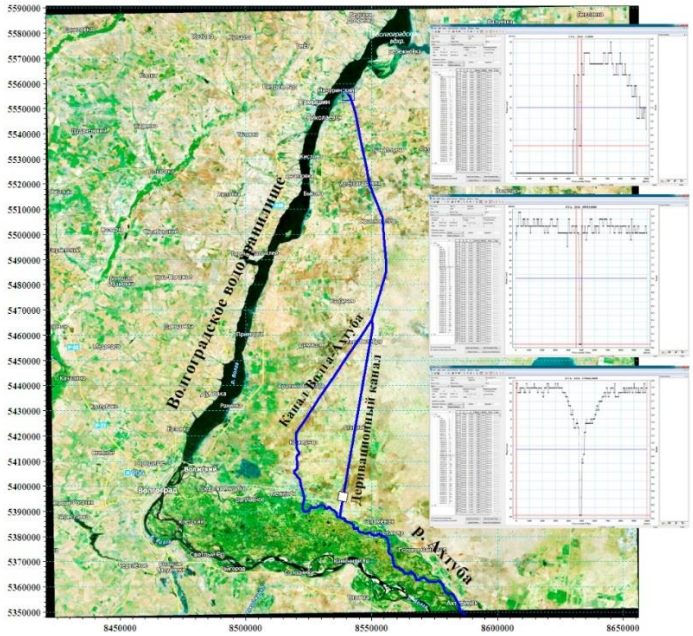


Рис. 4 – Трасса и характерные поперечные сечения гидродинамической модели Волго-Ахтубинского канала

Граничные условия в ГДМ модели Канала задаются: в голове МК - уровнем (Волгоградского водохранилища), в хвосте Канала (концевой створ р. Ахтуба) – зависимостью Q=f(h).

Результаты и обсуждение

Выполнен расчет по двум моделям: ГДМ ВГУ и ГДМ Канала, получены основные гидравлические параметры потока при различных вариантах отметок в голове Канала.

Результаты расчетов на ГДМ ВГУ

Были выполнены расчеты на ГДМ ВГУ по наблюденным данным весеннего половодья 2024-го и 2025-го годов. Были получены расходы, уровни и скорости во всех створах Волгоградского водохранилища. На рис. 5 приведены указанные посуточные результаты для створа у с. Рыбное, где планируется построить головное сооружение Канала (максимальные скорости: 2024 г. – 0,45 м/с, 2025 г. – 0,36 м/с). При этом в Верхнем бьефе ВГУ максимальные скорости составили: 2024 г. – 0,33 м/с, 2025 г. – 0,26 м/с и держались несколько дней.

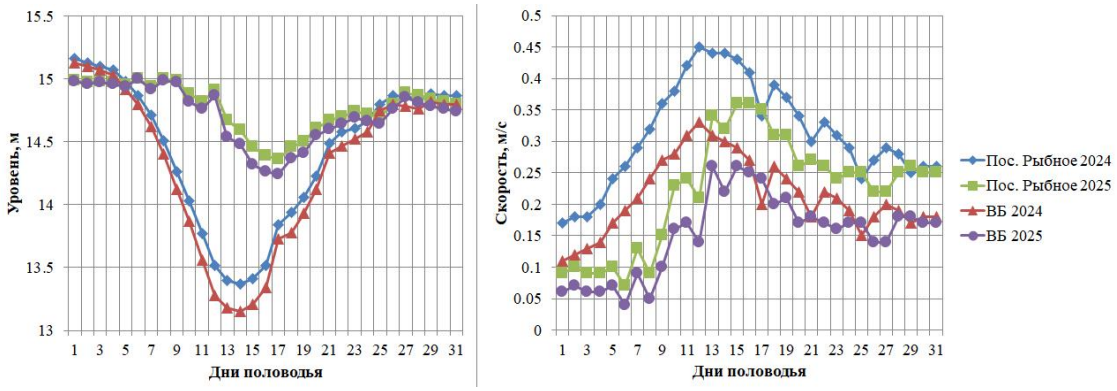


Рис. 5 – Уровни воды и скорости течения в створе предполагаемого водозабора в Канал

Результаты расчетов на ГДМ Канала

На ГДМ выполнялся расчет уровня, расхода и скорости течения в основном русле канала и в деривационном канале. Результаты моделирования приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты моделирования уровня, расхода и скорости течения

С. Рыбное, Уровень, м	Расход в МК, $м^3/с$	Скорости в МК, м/с	ВБ Деривационной ГЭС, м	НБ Деривационной ГЭС, м	Напор на ГЭС, м	Расход в ДК, $м^3/с$
15	347.5	0.86	2.69	-13.88	16.57	95.8
14.5	280.64	0.79	2.62	-14.05	16.67	77.29
14	220.97	0.72	2.56	-14.23	16.79	60.76
13.5	168.32	0.65	2.5	-14.42	16.92	46.16
13	122.55	0.57	2.44	-14.65	17.09	33.47

Продольные профили МК и ДК при уровне воды в створе Волгоградского водохранилища 15 м приведены на рис. 6.

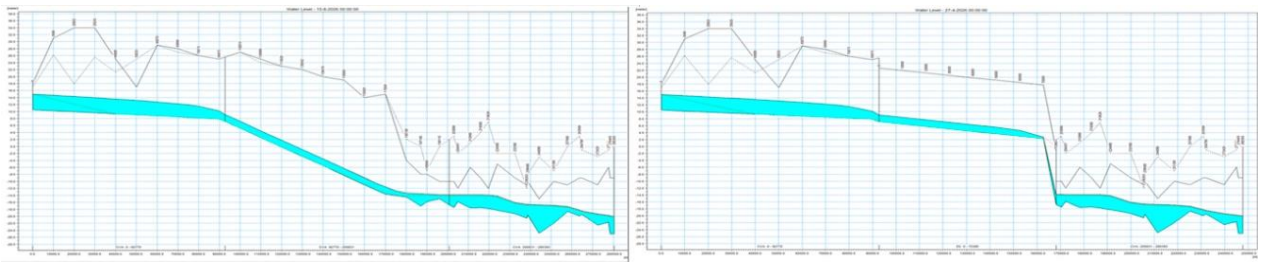


Рис. 6 – Продольные профили по трассе МК (сверху) и по трассе ДК (снизу)

Ориентировочная стоимость строительства Канала

Выполнен расчет ориентировочной стоимости земляных работ при строительстве Магистрального канала. Стоимость земляных работ при строительстве Деривационного канал взята в пропорции по длине от стоимости земляных работ по МК. Также определена предельная стоимость работ по строительству деривационной ГЭС на канале.

Расчет ориентировочной стоимости земляных работ при строительстве МК:

- Место забора воды – Рыбный, 100 км от ВБ ВГУ.
- Место разгрузки – река Ахтуба, 5 км ниже Ленинска.
- Протяженность – 180 000 м.
- Средняя глубина канала – порядка 24 м.
- Ширина канала – 100 м.
- Угол заложения – 1:3,5 (предварительно).
- Площадь поперечного сечения канала – 3 159 м^2.
- Объем разрабатываемого грунта – 583 465 400 м^3.

Разработка грунта ведется в два этапа:

1) Разработка грунта с перемещением до 10 м бульдозерами мощностью: 96 кВт (130 л.с.), группа грунтов 2. Общая стоимость с накладными расходами и сметной прибылью в текущем уровне цен, исходя из площади поперечников (2024 г.) - 17, 3 млрд. руб.;

2) Разравнивание кавальеров (отвалов) при перемещении грунта до 10 м бульдозерами мощностью: 96 кВт (130 л.с.), группа грунтов 2. Общая стоимость с накладными расходами и сметной прибылью в текущем уровне цен, исходя из площади поперечников (2024 г.) – 8,0 млрд. руб.

Общая ориентировочная стоимость выемки грунта по МК – 25,3 млрд. руб., по ДК – 15,7 млрд. руб. Таким образом общая ориентировочная стоимость земляных работ при строительстве Канала составит 41 млрд. руб.

Максимальная стоимость строительства Деривационной ГЭС составит:
800000 руб/ кВт * 15000 кВт = 12 млрд. руб.

Ориентировочная стоимость работ по обустройству нерестилищ на МК и мест сопряжения с Волгоградским водохранилищем и р. Ахтуба составит - 10 млрд. руб.

Ориентировочна стоимость Гидротехнических сооружений (сопряжение с Волгоградским водохранилищем и р. Ахтуба, противофильтрационное покрытие Канала), необходимых для эффективной работы Канала составит 1 млрд. руб.

Общая ориентировочная стоимость строительства Канала составит – 64 млрд. руб.

Ориентировочная стоимость проектирования (10%) -6,4 млрд. руб**.**

Ориентировочная стоимость строительства и проектирования Канала - 70,4 млрд. руб**.**

Экономическое обоснование строительства Канала

В 1970 году после запуска Волгоградской ГЭС осетровых добывалось 20000 т, при этом икры – 2000 т. В 1989 году улов осетровых еще был значителен и составлял 13000 т, икры соответственно – 1300 т. Стоимость в ценах 2025 г составляла в 1970 г осетровых – 40 млрд. руб. , икры – 400 млрд. руб.; в 1989 соответственно - 26 млрд. руб.

и 260 млрд. руб. Ожидаемый годовой экономический эффект при условии выполнения всех проектируемых многоцелевых условий функционирования Канала и при вылове хотя бы четверти улова 1989 года составит: осетровых – 6,5 млрд. руб., икры – 65 млрд. руб. Всего эффект только от частичного восстановления стада осетровых составит – 71,5 млрд. руб. Таким образом, при восстановлении четверти стада осетровых от улова в 1989 г, окупаемость проекта составит 1,5 года. Это без учета нереста в Волгоградском водохранилище других ценных пород рыб.

Эффект от ГЭС при выработке 15000 млн. кВт ч в год и стоимости 1 кВт ч для мелиорации - 1 руб. составит – 0,13 млрд руб. Он не сопоставим по стоимости с восстановлением стада осетровых, хотя, несомненно, послужит хорошим стимулом для развития сельского хозяйства на мелиорируемых землях.

Заключение

Строительство Канала несомненно даст значительный социальный, экологический и экономический эффект и вполне реализуем в современных условиях развития строительной техники. Остается один вопрос, пойдет ли в этот Канал рыба, в каком количестве и какая должна быть выполнена работа по обустройству нерестилищ в Канале, чтобы рыба пошла в период нереста в Волгоградское водохранилище. Но на этот вопрос необходимо получить квалифицированное обоснованное мнение ихтиологов.

Список литературы

1. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока. // Гидрологические исследования и прогнозы. № 1 (375). 2020. С. 176–189].

2. Институт Гидропроект. Комплекс гидротехнических сооружений, обеспечивающий дополнительное обводнение Волго-Ахтубинской поймы. Предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду (2082-ОВОС) Государственный контракт №1575/19 от 25.06.2019.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЕГРАДАЦИИ АРАЛЬСКОГО МОРЯ: ФИТОСАНИТАРНОЕ СОСТОЯНИЕ САКСАУЛОВЫХ ЛЕСОВ АРАЛЬКУМА

*Гаппаров Ф.А.[1], **Ганиев М.Ш**.[1], Шамуратова Н.Г.[2],*
Хасанов Ж.Д.[2], Менлимуратова С.Ж.[2]
[1]Агенство по лесоразведению и увеличению зеленых зон, борьбе с опустыниванием Национального комитета по экологии и изменению климата Республики Узбекистан, г. Ташкент
[2]Каракалпакский институт сельского хозяйства и агротехнологий , г. Нукус
E-mail: muratles@mail.ru

Аннотация: Опустынивание дна бывшего Аральского моря и формирование пустыни Аралькум обусловили необходимость масштабных лесомелиоративных работ по закреплению подвижных песков и снижению солепылевого выноса. Ведущая роль при создании лесонасаждений принадлежит саксаулу чёрному (*Haloxylon aphyllum*), способному задерживать значительный объём песчаных частиц и формировать устойчивый растительный покров в экстремальных условиях пустыни. Одновременно с расширением площади саксаульников (свыше 1,9 млн га по состоянию на 2024 г.) в Аралькуме сформировался специфический энтомологический комплекс, включающий как опасных вредителей лесонасаждений, наносящих эколого-экономический ущерб, так и видов, определяющих устойчивость новых агробиоценозов. В результате наблюдений за фитосанитарным состоянием саксауловых насаждений южного Приаралья на территории Каракалпакстана Республики Узбекистан рассмотрены галлообразующие двукрылые семейства *Cecidomyiidae* (род *Asiodiplosis*, вид *Stefaniola gigas*), возбудитель мучнистой росы саксаула (*Erysiphe sp*.), а также саранчовые. Установлено, что антропогенная трансформация ландшафта Аралькума создаёт благоприятные условия для массового размножения большой саксауловой горбатки (*Dericorys albidula Serv*.). При этом, с 2017 г. ежегодно проводятся химические обработки, в 2024 г. площадь поражения саранчовыми составила порядком 100 тыс. га. Материалы статьи могут быть использованы при разработке системы интегрированной защиты саксауловых насаждений в зоне экологического бедствия.

Ключевые слова: Аральское море, Аралькум, опустынивание, саксаул чёрный, фитосанитарное состояние, саранчовые.

ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF DEGRADATION OF THE ARAL SEA: PHYTOSANITARY STATUS OF THE SAXAUL FORESTS OF ARALKUM

*Gapparov F.A.,[1], **Ganiev M.S.**[1], Shamuratova N.G..[2],*
Khasanov J.D.[2], Menlimuratova S.J.[2]
[1]Agency for Afforestation and Enhancement of Green Zones, Combating Desertification of the National Committee for Ecology and Climate Change of the Republic of Uzbekistan, Tashkent
[2]Karakalpak Institute of Agriculture and Agrotechnologies, Nukus
E-mail: muratles@mail.ru

Abstract: Desertification of the bottom of the former Aral Sea and the formation of the Aralkum desert necessitated large-scale forest reclamation work to consolidate shifting sands and reduce salt and dust removal. The leading role in the creation of forest stands belongs to the black saxaul (*Haloxylon aphyllum*), which is able to retain a significant amount of sand particles and form a stable vegetation cover in extreme desert conditions. Simultaneously with the expansion of the area of saxaul forests (over 1.9 million hectares as of 2024), a specific entomological complex has formed in Aralkum, including both dangerous pests of forest plantations that cause ecological and economic damage, and species that determine the sustainability of new agrobiocenoses. As a result of observations of the phytosanitary condition of saxaul plantations in the southern Aral Sea region in the territory of Karakalpakstan, the Republic of Uzbekistan, gall-forming diptera of the family *Cecidomyiidae* (genus *Asiodiplosis*, species *Stefaniola gigas*), the causative agent of powdery mildew saxaula (*Erysiphe sp*.), as well as locusts were considered. It has been established that anthropogenic transformation of the Aralkum landscape creates favorable conditions for mass reproduction of the great saxaul humpback (*Dericorys albidula Serv*.). At the same time, chemical treatments have been carried out annually since 2017, and in 2024. the area affected by locusts was about 100 thousand hectares. The materials of the article can be used in the development of an integrated protection system for saxaul plantations in an ecological disaster zone.

Keywords: Aral Sea, Aralcum, desertification, black saxaul, phytosanitary status, locusts.

Когда-то Аральское море считалось четвёртым по величине озером мира, его площадь достигала 68 000 км². Начиная с 2000-х годов на месте водоёма стремительно сформировалась новая пустыня — Аралькум. Это самая молодая пустыня Земли, ещё шестьдесят лет назад бывшая настоящим морем. После катастрофического обмеления дно Аральского моря стало сухим, засолённым и практически безжизненным. До появления первых саксауловых насаждений всё пространство до горизонта занимала беловатая от соли земля, палящее солнце и ветер, поднимающий тончайшую

солепылевую взвесь, разносимую на сотни километров. Высыхание моря имело катастрофические последствия как для его прежних обитателей, так и для населения прибрежных территорий [3].

В связи с изменением климата и повышением среднегодовых температур в Южном Приаралье и дельте Амударьи уже к 2022 году полностью высохло более двенадцати постоянных и более десяти сезонных озёр. Ежегодно с обнажившегося дна Аральского моря поднимается и разносится ветром более 100 млн тонн пыли и токсичных солей, следы которых фиксируются вплоть до Европы и Антарктиды [7]. Трагедия, постигшая Узбекистан и Казахстан, приобрела глобальное измерение и потребовала поиска действенных путей минимизации экологического ущерба. Одним из наиболее эффективных решений стала масштабная посадка кустарниковой растительности, устойчивой к экстремальным условиям пустыни.

Экологическая роль саксаула в стабилизации ландшафта Аралькума. Саксаул — одно из немногих растений, способных не только выживать в условиях засоления и острого дефицита влаги, но и возрождать жизнь в пустыне. Один куст средневозрастного саксаула способен задержать до 10 м³ песчаных частиц, что и определило выбор этой породы в качестве основы лесомелиоративных работ на осушенном дне Аральского моря. Создание экологически сбалансированных кустарниковых ландшафтов путём формирования системы взаимодействующих зоомелиоративных насаждений является активным средством улучшения хрупкой природной экосистемы Аралькума. Появление зелёных насаждений способствует формированию качественно новых экосистем: улучшается экологическая обстановка, складывается своеобразный энтомокомплекс, усложняются трофические цепи, изменяется структура фаунистических сообществ, поведение и роль отдельных экологических групп насекомых. Как известно, саранчовые относятся к числу основных групп насекомых в травянистых биоценозах, и их роль в формирующихся саксаульниках требует отдельного изучения.

Начиная с 2014 года и по настоящее время в Аралькуме ведётся непрерывная посадка саженцев саксаула. За сравнительно короткий срок общая площадь саксауловых насаждений на дне Аральского моря в пределах Узбекистана превысила 1,9 млн га. Практика последних десяти лет подтвердила, что посев и посадка саксаула и других галофитных растений на осушенном дне моря являются одним из наиболее действенных способов снижения выноса пыли и соли в окружающую среду. Насаждения песчаных пород защищают прилегающие территории от засыпания солепылевыми частицами, способствуя улучшению экологической обстановки не только в самом Аралькуме, но и во всём Приаралье [4]. В настоящее время в Аралькуме сформированы полноценные

саксауловые кустарниковые леса — на каждом гектаре произрастает от 400 до 700 деревьев саксаула чёрного (*Haloxylon aphyllum*), играющего ключевую роль в стабилизации пустынного ландшафта.

Формирование энтомокомплекса саксауловых насаждений и фитосанитарные проблемы. Вместе с ростом площади саксаульников на дне Аральского моря обозначились и новые проблемы — вредители и болезни саксаула. Одним из наиболее заметных и повсеместно встречающихся на саксауле чёрном факторов являются галлы [5]. Важнейшим биогенных факторов, оказывающих заметное влияние на формирование растительных ассоциаций саксауловых лесов, служат насекомые, клещи и грызуны: питаясь листьями, побегами, корнями, цветками и плодами либо повреждая их, они прямо влияют на продолжительность жизни и продуктивность растений. Особое место в этом комплексе занимают галлообразователи, жизненный цикл которых почти полностью протекает в тканях растения-хозяина. На саксауле чёрном доминируют галлицы-фитофаги, развивающиеся в почковых галлах и относящиеся к роду *Asiodiplosis*.



Рис. 1 - Галлы, образуемые галлицами семейства Cecidomyiidae на побегах саксаула чёрного

Галлообразующие вредители саксаула. На саксауле (*Haloxylon*) паразитирует целая группа специализированных насекомых из семейства галлиц (*Cecidomyiidae*). В зависимости от места образования галлов на растении их принято делить на три основных типа, формирующихся под воздействием галлиц-комариков — постоянных и многочисленных обитателей саксауловых насаждений [5]. Галлы отличаются значительным разнообразием формы и размеров: от мелких шаровидных до

продолговатых образований диаметром от 3 до 10 мм; окраска галлов изменяется в зависимости от декады вегетационного периода (рис. 1). Зимуют личинки внутри галлов, а лёт галлиц в условиях Аралькума начинается в середине мая — конкретные сроки определяются температурным режимом воздуха.

Массовое размножение галлиц (*Cecidomyiidae,* в частности рода *Asiodiplosis*) наносит ощутимый удар по искусственным и естественным насаждениям саксаула в уязвимой экосистеме Аралькума [5]. Катастрофические последствия жизнедеятельности этих галлообразующих вредителей, приводящие к постепенному усыханию и гибели деревьев, можно свести к нескольким ключевым этапам. Во-первых, личинки галлиц развиваются внутри вегетативных органов саксаула, образуя чешуйчатые, булавовидные или почковидные вздутия (галлы); ткани в этих местах деформируются, сосуды древесины пережимаются, что блокирует доставку влаги и питательных веществ к верхним побегам [5]. Во-вторых, происходит уничтожение ассимиляционных побегов: поскольку саксаул не имеет полноценных листьев и фотосинтез протекает в его зелёных веточках, листовые и побеговые галлицы уничтожают верхушечные почки и деформируют побеги, полностью лишая растение возможности генерировать необходимую для роста энергию [5]. В-третьих, отмечается прекращение семенного размножения: цветочные галлицы поражают генеративные органы в период их закладки, что ведёт к абортированию семян и лишает саксауловые леса потенциала к самовосстановлению [5].

Наряду с представителями рода *Asiodiplosis,* существенную роль в комплексе галлообразующих вредителей саксаула играет Стефаниола гигантская (*Stefaniola gigas*). Продолговатые утолщения формируются на одревесневших стволиках: в каждом таком галле находится небольшая полость, в которой развивается розовая личинка (рис. 2). Галл растёт на протяжении всего лета, а следующей весной из него вылетает пёстрый комарик-галлица. Отдельный тип повреждений представлен мелкими шарообразными утолщениями на тонких стволиках, расположенными на члениках побега один за другим, подобно бусинам; личинки в таких галлах имеют оранжево-красную окраску и узкое удлинённое тело.



Рис. 2 - Галлы *Stefaniola gigas* на побегах саксаула

Ещё один характерный тип повреждений — булавовидные вздутия на стволах, на каждом из которых располагается скопление чёрных чешуйчатых шишечек — галлы вредоносной галлицы, нередко в массе, поражающей саксаул и приводящей его к гибели.

Значительные повреждения саксаулу наносят также листоблошки семейства *Aphalaridae (Caillardia azurea, C. robusta, C. notata*), галлы которых развиваются несколько позже галлов, вызываемых галлицами. Среди комплекса вредителей саксаула необходимо отметить и другие виды, имеющие хозяйственное значение: пустынную совку, саксаульного долгоносика, пустынную златку и жука-усача. Вместе с тем в последние годы основным вредителем саксаула на осушенном дне Аральского моря является большая саксауловая горбатка — вид саранчовых, биологии и вредоносности которого посвящён отдельный раздел настоящей статьи.

Мучнистая роса — грибковое заболевание саксаула. Мучнистая роса представляет собой главное и наиболее опасное грибное заболевание саксаула: поражая зелёные побеги растения, выполняющие функцию листьев, оно способно приводить к массовой гибели саксаульников в Аралькуме (рис. 3). Грибковый мицелий возбудителя (*Erysiphe sp.*) покрывает ассимиляционные побеги плотным белым налётом, что в условиях экстремальной пустыни запускает целый ряд негативных процессов.



Рис. 3 - Саксаульник, поражённый мучнистой росой *(Erysiphe sp.),* Аралькум

Прежде всего нарушается фотосинтез: белый налёт мицелия блокирует доступ солнечного света к тканям побегов, вследствие чего растение резко снижает выработку органических веществ, истощая внутренние ресурсы. Одновременно происходит разрушение кутикулы и усиленная потеря влаги — эктопаразитический гриб проникает внутрь клеток побегов, повреждая их защитную оболочку, что в условиях экстремально сухого и жаркого климата Аралькума вызывает неконтролируемое испарение и без того дефицитной влаги. Поражённые молодые побеги и завязи желтеют, покрываются некротическими пятнами и преждевременно засыхают, что полностью лишает дерево возможности развиваться. Совокупным итогом перечисленных процессов становится критическое снижение иммунитета растения: ослабленный болезнью саксаул теряет устойчивость к засухе, высоким температурам и засолению почвы, превращаясь в лёгкую мишень для вторичных вредителей — пустынной саранчи, галлиц и саксаульной златки.

Саранчовые в биоценозах саксаульников Аралькума. В последние годы в Аралькуме сформировался новый очаг саранчи, ощутимо вредящей саженцам и кустарникам саксаула чёрного, что напрямую связано с процессами формирования энтомофауны древесных и кустарниковых пород в условиях защитного лесоразведения. До настоящего времени целенаправленного изучения формирования населения саранчовых во вновь создаваемых растительных сообществах Аралькума и путей их приспособления к новым условиям среды практически не проводилось, что определяет высокую теоретическую и практическую значимость подобных исследований.

Расширение площади саксаульников в Аралькуме создаёт благоприятные условия для массового размножения большой саксауловой горбатки *(Dericorys albidula Serv.)*, вследствие чего значение саранчовых насекомых в регионе становится всё более многогранным (рис. 4).



Рис. 4 - Большая саксауловая горбатка *(Dericorys albidula Serv.)* на побегах саксаула

С одной стороны, может изменяться (уменьшаться либо увеличиваться) численность уже известных вредных видов — азиатской саранчи и итальянского пруса, — а также складываться условия, благоприятствующие их массовому размножению. С другой стороны, может меняться и общий характер видового разнообразия за счёт появления или исчезновения отдельных таксонов, популяций и изменения соотношения разных групп в сообществах. Кроме того, в новых условиях значение саранчовых может оказаться ещё существеннее для сохранения биоразнообразия — как важного элемента взаимосвязи растительного и животного мира [1].

Изменение климатических условий, связанное с формированием саксауловых лесов в Аралькуме, повлекло за собой появление многих видов насекомых, среди которых ведущее место по масштабам размножения занимает большая саксауловая горбатка. Среди видов рода *Dericorys* данный вид имеет наиболее широкий ареал распространения; вместе с тем ряд его биологических особенностей — периодичность массового размножения, миграционные перелёты и другие — остаются недостаточно изученными [6]. По своему значению как вредитель, большая саксауловая горбатка, хотя и не повреждает сельскохозяйственные культуры, уже сопоставима с такими видами саранчовых, как азиатская саранча (*Locusta migratoria migratoria L.*) и итальянский прус (*Calliptamus italicus italicus L.*).

Этот вид саранчи относится к типичным тамнобионтам: весь период личиночного развития и спаривания протекает непосредственно на кустарниках саксаула. Большая саксауловая горбатка является специализированным вредителем пустынных кустарниковых растений, в первую очередь саксаула. При массовом размножении личинки объедают практически все зелёные побеги кустарников, вследствие чего вновь

посаженный саксаул нередко погибает. В связи с ежегодным массовым размножением большой саксауловой горбатки в Аралькуме проводится регулярная химическая обработка насаждений против данного вредителя (рис. 5).



Рис. 5 - Место обитания большой саксауловой горбатки в саксаульнике на дне Аральского моря

Антропогенная динамика видового состава саранчовых Приаралья. Высыхание Аральского моря — антропогенно-природная экологическая катастрофа, связанная с потерей во второй половине XX века свыше 90% водного объёма моря и образованием на его месте пустыни Аралькум. Наступление пустыни на травянистые массивы в дельте Амударьи привело к сокращению численности одного из ранее опасных видов — азиатской саранчи — и одновременному подъёму численности другого вида — итальянского пруса. Будучи экологически пластичным видом, способным заселять самые разнообразные местообитания и питаться широким кругом растений, итальянский прус стал более опасным с хозяйственной точки зрения и практически полностью вытеснил азиатскую саранчу с занимаемых ранее территорий. Антропогенные факторы в Приаралье воздействовали на численность и структуру популяций вредных саранчовых через изменение структуры экосистем, включая абиотические и биотические факторы, формируя специфические микроклиматические условия. Значение вредных саранчовых насекомых в Приаралье становится всё более многогранным: расширение площади саксаульников создаёт благоприятные условия для массового размножения большой саксауловой горбатки как основного вредителя лесопосадок саксаула на дне Аральского моря.

Меры химической борьбы с большой саксауловой горбаткой. Начиная с 2017 года на различных участках Аралькума проводится плановая химическая обработка насаждений против большой саксауловой горбатки. Для подавления численности этого

вида саранчи применяются современные технические средства — мотодельтапланы и наземные опрыскиватели УАО. Так, только в 2024 году против данного вредителя была проведена химическая обработка на площади, превышающей 100 тыс. га, что свидетельствует о масштабе проблемы и необходимости разработки более эффективных, в том числе биологических, методов защиты саксауловых насаждений [2].

Таким образом, формирование саксауловых насаждений на осушенном дне Аральского моря стало одним из наиболее эффективных инструментов сдерживания опустынивания и снижения солепылевого выноса в Южном Приаралье. Вместе с тем расширение площади саксаульников (свыше 1,9 млн га) сопровождается формированием специфического и во многом ещё не изученного энтомокомплекса, в составе которого выделяются как галлообразующие вредители (*Cecidomyiidae, род Asiodiplosis, Stefaniola gigas*), так и возбудители грибковых заболеваний (мучнистая роса — *Erysiphe sp*.), существенно ослабляющие растения и снижающие их устойчивость к абиотическим стрессам. Особую фитосанитарную опасность представляет большая саксауловая горбатка (*Dericorys albidula Serv*.) — типичный тамнобионт, весь цикл развития которого протекает на кустарниках саксаула и который за последние годы стал главным вредителем саксаульников региона, требующим ежегодных химических обработок на площади свыше 100 тыс. га. Полученные данные свидетельствуют о необходимости дальнейшего целенаправленного изучения биологии и экологии выявленного комплекса вредителей и болезней саксаула в условиях Аралькума, а также разработки научно обоснованной системы интегрированной защиты растений, сочетающей мониторинг, биологические методы (в частности, энтомопатогенные препараты) и рациональное применение химических средств защиты растений, что должно стать предметом дальнейших исследований в рамках диссертационной работы.

Список литературы

1. Михайлов В. Н. Почему обмелело Аральское море // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 2. — С. 85–91.

2. Röthlisberger R., Mulvaney R., Wolff E. W., Hutterli M. A., Bigler M., Sommer S., Jouzel J. (2002) Dust and sea-salt variability in central East Antarctica (Dome C) over the last 45 kyrs and its implications for southern high-latitude climate. Geophysical Research Letters, 29 (20), 24-1–24-4. DOI: 10.1029/2002GL015186.

3. Новицкий З. Б., Хамзаев А. Х., Бакиров Н. Ж., Атаджанова Г. Х. Создание постоянных лесосеменных участков саксаула (Haloxylon aphyllum (Minkw.)) на осушенном дне Аральского моря // Russian Journal of Ecosystem Ecology. — 2022. — Т. 7, № 2. DOI: 10.21685/2500–0578-2022-2-1.

4. Orolbo'yi tubida yangidan barpo etilayotgan saksovulzorlarda shishish hosil qiluvchi kana va zararkunandalar: тавсиянома (Клещи и вредители, вызывающие галлообразование в саксаульниках, вновь создаваемых на дне Приаралья: рекомендации). — Нукус, 2025.

5. Гаппаров Ф. А. Биоэкологические особенности развития вредных саранчовых в Узбекистане и меры борьбы с ними. — Ташкент: Навруз, 2014. — 336 с.

6. Gapparov, F.A., Latchininsky, A.V., Nurzhanov, A.A. & Tufliev, N. (2016) The large saxaul humpbacked grasshopper (*Dericorys albidula* Serv.) in Uzbekistan. *Metaleptea*, 36(2), 17-19.

7. Гаппаров Ф. А., Эшчанов Б. Р. Массовое размножение саксаульной горбатки в Узбекистане // Материалы Респ. науч.-практ. конф. молодых учёных, посвящ. «Году молодёжи». — Ташкент, 2008.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЯХ РЕК

Горелиц О.В., *Землянов И.В., Павловский А.Е., Милютина И.Ю., Мигунов Д.А., Ермакова Г.С.*
Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия
gorelits@mail.ru

Аннотация: Рассматривается технология разработки и результаты эксплуатации согласованных гидродинамических моделей типа «река-море» для краткосрочного прогнозирования уровней воды в устьях рек Волги и Дона – ключевых узлах Международных транспортных коридоров. Представлены этапы разработки модели для устьевой области Невы в условиях работы Комплекса защитных сооружений. Интеграция речной и морской гидродинамических моделей в единый программный комплекс и дополнение его модулем экологических расчетов открывает широкие возможности в решении задач информационного обеспечения управления водохозяйственным комплексом в устьевых областях рек в условиях роста антропогенной нагрузки на фоне современных климатических изменений и связанных с ними колебаний уровня моря.

Ключевые слова: устья рек Волги, Дона, Невы, уровень воды, гидродинамическое моделирование.

HYDRODYNAMIC MODELING IN APPLIED RESEARCH IN RIVER MOUTH AREAS

Gorelits O.V., *Zemlyanov I.V., Pavlovsky A.E., Milyutina I.Yu., Migunov D.A., Ermakova G.S.*
Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia
gorelits@mail.ru

Annotation: The paper presents technology of the development and results of operation of "river-sea" hydrodynamic coupled models for short-term forecasting of water levels in the mouths of the Volga and Don Rivers – key points of International transport corridors. The model development for the Neva River mouth area taking into account operation of the Flood Protection Facilities Complex is presented. The integration of river and marine hydrodynamic models into a unified software suite, supplemented with an environmental modeling module, opens up wide opportunities for addressing the challenges of information support for water management of river mouth areas under increasing anthropogenic pressure against the background of modern climate changes and related sea level fluctuations.

Keywords: Volga River, Don River, and Neva River mouth areas, water level, hydrodynamic modeling.

Исторически устьевые области рек являются важнейшими узлами пересечения водных и сухопутных транспортных артерий, центрами концентрации промышленного и сельскохозяйственного производства, портового хозяйства. Устья рек принадлежат к числу наиболее нагруженных географических объектов: здесь расположены крупнейшие города и агломерации, что определяет исключительно высокую антропогенную нагрузку на прибрежные экосистемы.

В Транспортной Стратегии РФ сформулировано приоритетное развитие Международных транспортных коридоров (МТК) как одного из ведущих механизмов повышения транспортной связности территории Российской Федерации и увеличения объемов транзита грузов между Азией и Европой. По внутренним водным путям Европейской территории РФ идет транспортировка грузов в рамках крупнейшего МТК «Север-Юг» с выходом к Трансарктическому транспортному коридору (ТТК) для соединения с перевозками по Северному морскому пути.

На Европейской территории России устьевые области крупнейших судоходных рек Волги, Дона, Невы, Северной Двины, Печоры выступают узловыми коммуникационными пунктами активно развивающихся транспортных коридоров. В перспективе рассматривается активное развитие портовой и сухопутной транспортной инфраструктуры в устьях рек Онеги и Мезени (Белое море), Индиги (Баренцево море). Однако именно эти переходные зоны «река–море», будучи наиболее динамичными элементами географической среды, в наибольшей степени подвержены влиянию глобальных и региональных климатических изменений, проявляющихся как в изменении характеристик речного стока, так и в росте повторяемости экстремальных сгонно-нагонных явлений на фоне долговременных колебаний уровня моря, что создаёт дополнительные риски для хозяйственной деятельности и требует адекватного информационного обеспечения.

Активное освоение устьевых областей рек и прибрежных зон морей, происходящее на фоне современных климатических трендов, требует качественно нового уровня гидрологической и океанографической информации. Сокращение в последние десятилетия данных наземной наблюдательной сети и регулярных специализированных полевых изысканий делает крайне затруднительной достоверную оценку гидрологического режима устьевых областей рек исключительно эмпирическими методами.

В этих условиях остро встаёт задача разработки альтернативных механизмов получения объективных данных о состоянии природной среды и параметрах гидрологического режима устьев рек. Актуальным решением может стать переход к

архитектуре интегрированной цифровой платформы, ядром которой является высокопроизводительное гидродинамическое моделирование, ассимилирующее массивы данных наблюдений, поступающих от различных наблюдательных платформ, включая данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). Этот подход не только позволяет компенсировать существующий объективный недостаток натурных измерений, но и служит основой для систем раннего предупреждения опасных явлений. Данная архитектура обеспечивает:

• компенсацию дефицита *in-situ* измерений за счет синтетических рядов данных;

• формирование прогностического ядра для функционирования систем раннего предупреждения о возникновении опасных природных явлений.

В настоящее время спектр прикладных задач, решаемых с помощью гидродинамического моделирования в устьевых областях рек, охватывает три критически важных направления:

• обеспечение безопасности транспортных операций – прогнозирование уровня воды, скорости и направления течения в судоходных фарватерах для оптимизации проводки судов на мелководных участках устьевых баров и предотвращения аварийных ситуаций;

• снижение экологической нагрузки – моделирование переноса, диффузии и трансформации загрязняющих веществ в зоне смешения речных и морских вод, что необходимо для оценки рисков и принятия оперативных мер при техногенных сбросах;

• гидрометеорологическая безопасность в условиях климатических изменений – расчёт экстремальных гидрометеорологических событий: сгонно-нагонных колебаний уровня, штормовых нагонов и наводнений в дельтах рек, частота и интенсивность которых неуклонно возрастают.

В настоящее время в Государственном океанографическом институте им. Н.Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН») ведется разработка программно-технологических расчетно-модельных комплексов (РМК) диагноза и прогноза гидрометеорологических условий в устьевых областях крупных судоходных рек и прибрежной зоне морей. Расчетно-модельные комплексы разрабатываются в целях оперативного предоставления пользователям актуальной информации о текущих параметрах гидрологического режима устьев рек и прогноза уровней воды в транзитной зоне река-море [1, 2].

В основе комплексной технологии информационного обеспечения лежит использование системы согласованных гидродинамических моделей «река-море». В качестве прототипов системы в режиме опытной эксплуатации действуют РМК, разработанные для устьевой области Дона, включая Азово-Донской морской канал

(АДМК), и для устьевой области Волги, включая Волго-Каспийский морской судоходный канал (ВКМСК) [3, 4]. В составе этих РМК работают совместно речная двумерная гидродинамическая модель Delft3D и морская гидротермодинамическая модель циркуляции INMOM [5, 6, 7, 8, 9]. В работе используются синтетические цифровые модели рельефа (ЦМР) [10, 11], которые дополнены данными промерных работ, выполненных при участии авторов, и материалами Атласов ЕГС (Лоций). Расчеты проводятся на сетках с переменным шагом и широким диапазоном пространственного разрешения – от 10 м пределах русла магистральных рукавов и дельтовых водотоков до 100-150 м на пойме и прилегающих территориях и на устьевом взморье.

Для разработки системы согласованных моделей «река-море» в устьевой области Невы вместе с моделью INMOM использована речная двумерная гидродинамическая модель HEC-RAS [12]. Выбор обусловлен широкими возможностями для создания гибридных расчетных сеток, которые представлены в этом программном комплексе.

Расчетно-модельные комплексы РМК «Дон-модель» и РМК «ВКМСК-модель» объединяют речные гидродинамические модели с моделями циркуляции Азовского моря и Каспийского моря. РМК «Дон-модель» предназначен для краткосрочного прогнозирования уровней воды по судоходному рукаву дельты от створа в районе г. Аксай до устьевого взморья в створе Таганрог-Очаковская коса, включая трассу АДМК [1, 3, 9]. В качестве начальных условий задается расход воды в вершине устьевой области р. Дон, граничными условиями являются прогнозные значения уровня Азовского моря в створе сопряжения речной и морской моделей. РМК «ВКМСК-модель» предназначен для краткосрочного прогнозирования уровней воды по трассе Волго-Каспийского морского судоходного канала от вершины дельты Волги у с. Верхнелебяжье до его выхода на границу устьевого взморья [4, 6, 13]. В качестве начальных условий задается расход воды в вершине устьевой области р. Волги, граничными условиями являются прогнозные значения уровня Каспийского моря в створе сопряжения речной и морской моделей.

Выходной информацией моделирования является прогноз ежечасных уровней воды. Для устьевой области р. Дон прогнозные значения фиксируются в контрольных точках – на гидрологических постах в г. Аксай, г. Ростов-на-Дону, г. Азов, г. Таганрог. Для устьевой области Волги прогноз ежечасных уровней воды выдается в контрольных точках на гидрологических постах с. Верхнелебяжье, г. Астрахань, с. Оля, а также по трассе ВКМСК в тех пунктах, которые в текущей ситуации являются лимитирующими для обеспечения безопасного судоходства.

Оценка качества прогноза уровней выполняется согласно РД 52.27.759–2011 «Наставление по службе прогнозов» [14] на основе сопоставления с фактическими

значениями уровней воды в контрольных точках. Общая оправдываемость прогнозов выражается процентным отношением числа оправдавшихся прогнозов к общему числу прогнозов. Помимо оперативных прогностических расчетов, по окончании периода навигации, проводятся ретроспективные расчеты для повышения качества моделирования [15].

Оценка качества прогноза уровней в устье Дона по результатам ретроспективных расчетов РМК «Дон-модель» за безледный период (апрель – ноябрь 2024 г.), выполненных с учетом актуальных уточнений, показала хорошие результаты. Оправдываемость уточненного прогноза уровней в устье Дона для всех контрольных точек превышает 85%. Разработка РМК «ВКМСК-модель» ведется в условиях продолжительного снижения уровня Каспийского моря, оценка качества прогноза уровней в устье Волги выполняется в процессе тестирования РМК. Оправдываемость прогноза на примере предполоводного периода (март – апрель 2024 г.) в контрольных точках составила от 64% (п. Оля) до 73% (г. Астрахань).

Опыт разработки и эксплуатации РМК «Дон-модель» и РМК «ВКМСК-модель» показал эффективность принятой архитектуры интегрированной цифровой платформы на основе согласованных гидродинамических моделей «река-море» для решения оперативных задач. Для построения расчетно-модельного комплекса РМК «Нева-модель» на основе согласованных гидродинамических моделей HEC-RAS [16] и INMOM [8] в настоящее время ведется подготовка синтезированной ЦМР устьевой области Невы. ЦМР включает все современные гидротехнические сооружения в дельте и на устьевом взморье, судоходные фарватеры и намывные территории в Невской губе, Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. В настоящее время РМК «Нева-модель» находится в стадии разработки.

Устьевые области рек, как переходные природные системы на границе река-море, реагируют на климатические изменения и антропогенное воздействие значительно острее, чем континентальные или морские регионы. Одной из проблем в условиях роста антропогенной нагрузки является загрязнение водной среды и донных отложений в устьях рек. Поэтому актуальным направлением развития комплексной технологии информационного обеспечения ФГБУ «ГОИН» является интеграция экологических расчетных блоков в действующие РМК для устьевых областей рек.

Перспективы развития РМК связаны с дополнением блока гидродинамических расчетов экологическим блоком. В программном комплексе Delft3D такая задача реализуется с помощью модуля качества воды D-Water Quality [17]. Этот модуль использует гидродинамическую информацию из модуля Delft3D-FLOW [18], а затем

решает уравнение *переноса-диффузии-реакции* для широкого спектра веществ. В библиотеке модуля D-Water Quality содержатся данные для расчетов по 140 стандартным веществам и описано более 50 физических, биохимических и биологических процессов, включая полные циклы углерода, азота, фосфора, кремния и кислорода, а также тяжелые металлы, органические вещества, БПК, ХПК, биомассу водной растительности, бактериальные загрязнители. Модуль D-Water Quality позволяет учитывать природные процессы, происходящие на границе водной среды с атмосферой и с донными отложениями. В моделирование качества воды включаются не только химические элементы, но и биологические компоненты природной среды, что позволяет детально описывать сложные экологические взаимодействия.

Результаты работы модуля D-Water Quality используются для моделирования распространения загрязнения в результате сброса сточных вод и при аварийных ситуациях, для оценки влияния сточных вод на концентрацию биогенных элементов и первичную продукцию, для исследования запасов растворенного кислорода, для изучения и прогнозирования процесса эвтрофикации. Также модуль позволяет проводить расчеты транспорта наносов для анализа последствий дноуглубительных работ.

В программном комплексе HEC-RAS, выбранном для разработки РМК «Нева-модель», моделирование качества воды реализуется через несколько специализированных модулей, которые интегрированы в общую гидродинамическую модель [19]. В модели используется модуль общих компонентов GCSM (General Constituent Simulation Module), который позволяет производить расчеты переноса различных веществ (консервативных, взвешенных), для которых не требуется детальная биогеохимия. Модули питательных веществ NSM I и NSM II (Nutrient Simulation Module) предназначены для моделирования эвтрофикации и включают расчеты биогенных элементов (азота и фосфора), растворенного кислорода, БПК, а также роста водорослей. Моделируются процессы нитрификации, денитрификации, минерализации и ассимиляции биогенов водорослями. Также имеется отдельный модуль диагенеза донных осадков (Sediment Diagenesis Module), который моделирует процессы разложения органического вещества в донных отложениях и обратный поток биогенных элементов в воду.

Программный комплекс HEC-RAS зарекомендовал себя как инструмент, позволяющий надежно моделировать эвтрофикацию, биогенные элементы и общее качество воды в речных системах. Он активно используется для анализа предельно допустимых общих нагрузок загрязнителей, экологического восстановления рек и оценки воздействия на водные экосистемы.

Реализация экологических модулей Delft3D и HEC-RAS в рамках разработки и внедрения современных технологий информационного обеспечения в ФГБУ «ГОИН» позволит существенно расширить круг решаемых природоохранных и инженерных задач, которые стоят перед исследователями – гидрологами, океанологами и экологами – в сложных природных системах устьевых областей рек и прибрежной зоны морей.

Список литературы

1. Землянов И.В., Павловский А.Е., Милютина И.Ю., Кудряшов С.А., Горелиц О.В. Технология моделирования и прогноза уровней воды на основе согласованных моделей река-море на примере устьевой области реки Дон // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 38–50. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-38-50

2. Мигунов Д.А., Терский П.Н., Горелиц О.В., Раткович Е.Л. Современное распределение стока в дельте Волги – анализ и моделирование // Метеорология и гидрология. 2023. №12. С. 69–81.

3. Землянов И.В., Павловский А.Е., Милютина И.Ю., Кудряшов С.А., Горелиц О.В. Согласование комплекса гидродинамических моделей река-море в задачах краткосрочного прогноза уровней воды в устьевой области Дона // Метеорология и гидрология. 2026. № 4. С. 96–109. DOI: 10.52002/0130-2906-2026-4-96-109.

4. Д. А. Мигунов, П. Н. Терский, О. В. Горелиц. Двумерная гидродинамическая модель западной части Дельты Волги на основе комплекса Delft3D - опыт разработки и первые результаты // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2-х томах, Ростов-на-Дону, 20–22 сентября 2023 года. Том 2. – Новочеркасск: ООО "Лик", 2023. – С. 292–296.

5. Землянов И.В., Мигунов Д.А., Горелиц О.В. Современные технологии цифровизации гидрометеорологического обеспечения для прогноза уровня на судоходных участках устьев рек // Гидротехника. 2025. № 1 (78). С. 15–23.

6. Мигунов Д. А., Тимошенко А. А. Анализ перераспределения стока в дельте р. Волги в условиях снижения уровня Каспийского моря на основе гидродинамического моделирования // В сборнике: Шестые Виноградовские чтения. Гидрология нового поколения. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербург, 2026. С. 530–535.

7. Официальный интернет-портал свободно распространяемого программного обеспечения Delft3D Нидерландского независимого института прикладных исследований в сфере поверхностного и подземного стока Deltares. Delft3D Open Source Software by Deltares: https://oss.deltares.nl/web/delft3d/ (дата обращения 11.08.2026)

8. Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и её климатической изменчивости в 1948-2007 гг. с помощью модели INMOM. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–15. DOI: 10.7868/S0002351513060072

9. Фомин В.В., Дианский Н.А. Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 69–80.

10. Официальный интернет-портал компании-разработчика ЦМР Fathom: www.fathom.global/product/fabdem. (дата обращения 18.06.2026).

11. Hawker, Laurence & Uhe, Peter & Paulo, Luntadila & Sosa, Jeison & Savage, James & Sampson, Christopher & Neal, Jeffrey. (2022). A 30m global map of elevation with forests and buildings removed. Environmental Research Letters. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f

12. Официальный сайт системы анализа рек Гидрологического инженерного центра Института водных ресурсов Инженерного корпуса армии США – Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS), Institute for Water Resources, U.S. Army Corps of Engineers (CEIWR): https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/ (дата обращения 11.08.2026).

13. Фомин, В. В., Дианский, Н. А., Коршенко, Е. А., Выручалкина, Т. Ю., "Система оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических характеристик Каспийского моря и оценка точности прогнозов по данным натурных измерений", Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 49–64.

14. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: Триада ЛТД, 2011. 189 с.

15. Землянов И.В., Павловский А.Е, Милютина И.Ю., Горелиц О.В. Источники ошибок прогноза сгонно-нагонных колебаний уровня при гидродинамическом моделировании устьевой области р. Дон // Метеорология и гидрология. 2024. № 11. С. 74–85. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-11-74-85.

16. HEC-RAS River Analysis System User’s Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis CA, Version 6.6, September 2024, 837 p.

17. D-Water Quality. Water Quality and Aquatic Ecology modeling suite. User Manual. Deltares, Delft, The Netherlands, Version 5.06, May 2020, 400 p.

18. Delft3D-FLOW. Hydro-Morphodynamics. 3D/2D modelling suite for integral water solutions. User Manual. Deltares, Delft, The Netherlands, Version 3.15, May 2020, 712 p.

19. HEC-RAS Water Quality User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis CA, October 2023, 120 p.

ЗОНАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЛМЫКИИ

Кониева Г.Н.
Калмыцкий филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Элиста
E-mail: konieva.g@yandex.ru

Аннотация: Проведён анализ динамики климатических показателей в Республике Калмыкия (1950–2025 гг.) по данным пяти метеостанций. Установлено устойчивое потепление (в среднем +0,3 °C/10 лет) с выраженной сезонной и пространственной неоднородностью. Рост осадков отмечен на западе и в центре республики (Городовиковск, Элиста), снижение — на севере (Малые Дербеты). По классификации ГТК и NIA подтверждена зональная дифференциация гидротермических условий; выделены аридный и гумидный типы потепления. Сопоставление с данными Росстата по посевным площадям (2015–2025 гг.) показывает доминирование зерновых культур и сокращение посевов кормовых и овощных культур. Результаты свидетельствуют о необходимости зонально адаптированных мер управления агроландшафтами.

Ключевые слова: климатические изменения, гидротермический коэффициент, аридность, тренды, посевные площади.

REGIONAL CLIMATE CHANGE AND LAND USE IN KALMYKIA

Konieva G.N.
Kalmyk branch of FGBNU "FNC VNIIGiM them. A.N. Kostyakova, Elista
E-mail: konieva.g@yandex.ru

Annotation: An analysis of the dynamics of climatic indicators in the Republic of Kalmykia (1950–2025) was carried out based on data from five weather stations. A steady warming trend has been established (on average +0.2 °C per 10 years), with pronounced seasonal and spatial heterogeneity. An increase in precipitation was observed in the west and center of the republic (Gorodovikovsk, Elista), while a decrease was recorded in the north (Malye Derbety). According to the GTK and NIA classifications, zonal differentiation of hydrothermal conditions has been confirmed; arid and humid types of warming have been identified. A comparison with Rosstat data on sown areas (2015–2025) shows the dominance of grain crops and a reduction in the sowing of forage and vegetable crops. The results indicate the need for zonally adapted measures to manage agrolandscapes.

Keywords: climate change, hydrothermal coefficient, aridity, trends, sown areas.

В настоящее время наращивание продуктивности аграрного сектора и рациональное использование земельных ресурсов выступают одними из приоритетных векторов развития экономики России. Это обусловливает востребованность научных разработок, нацеленных на формирование устойчивой системы землепользования [1-5].

Климатические изменения существенно влияют на функционирование экосистем и способствуют ухудшению состояния ландшафтов. Для Республики Калмыкия характерна выраженная неоднородность климатических условий — она проявляется в значительных температурных колебаниях и неустойчивом режиме увлажнения [6, 7]. В

связи с этим ключевым вектором развития сельского хозяйства становится эффективное управление агрогеоэкосистемами, направленное на поддержание их продуктивного потенциала и сохранение экологической устойчивости как фундамента аграрного производства.

Материалы и методы исследований. По данным метеорологических станций Республики Калмыкия проведен анализ региональной изменчивости среднемноголетних характеристик годовых температур воздуха и сумм осадков (Малые Дербеты, Элиста, Городовиковск, Яшкуль) за период 1950-2025 гг., а по метеостанции Лагань с 1960 г., так как до этого срока в архиве имеются массовые пропуски данных наблюдений. В соответствии с рекомендацией Всемирной метеорологической организации (ВМО) аномалии приводятся относительно базового среднемноголетнего периода 1991–2020 годов**.** Приведены оценки линейного тренда средней годовой температуры воздуха и сумм осадков по метеостанциям Республики Калмыкия; значимость оценивалась с использованием Т-статистики Стьюдента, где D – коэффициент детерминации (доля суммарной дисперсии, учтенная трендом). Коэффициент тренда является характеристикой средней скорости изменения климатического показателя на рассматриваемом отрезке времени. Величину изменения во временном ряду определяли с помощью критерия наклона Сена.

В работе представлен анализ динамики среднегодовых температуры воздуха и объемов атмосферных осадков в Калмыкии за 1950–2025 гг. Исследование базируется на данных метеостанций Малые Дербеты, Элиста, Городовиковск и Яшкуль и Лагань в соответствии с нормами ВМО, аномалии рассчитаны относительно базового периода 1991–2020 гг. Для оценки климатических изменений использовались линейные тренды (значимость которых проверялась по t-критерию Стьюдента) и коэффициент детерминации (D). Скорость изменения показателей определялась с помощью наклона Сена.

Репрезентативность исходных данных, а также достоверность и обоснованность выводов и рекомендаций обеспечены использованием надёжной информационной базы, в которую вошли официальные сведения Росреестра, данные статистических сборников, научные публикации, дополненные собственными аналитическими расчётами. Для расчёта показателей и выявления трендов применялся программный пакет Microsoft Excel.

Результаты исследований. Анализ временных рядов температурных индексов показывает наличие устойчивой климатической тенденции к потеплению. В последние десятилетия отчётливо прослеживается увеличение доли лет с аномально высокими

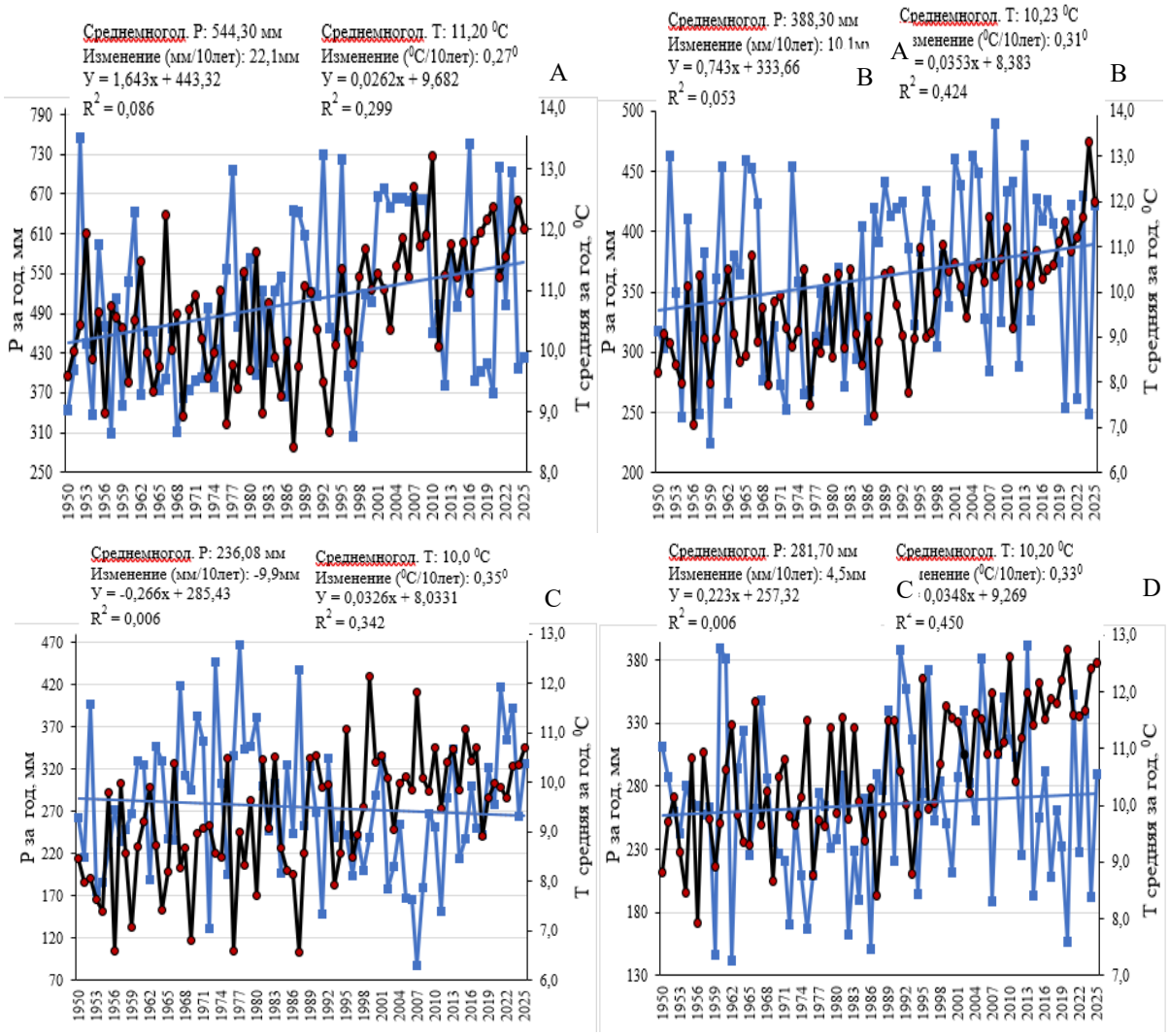
температурами. Данные метеостанций демонстрируют выраженную пространственную дифференциацию температурного режима по территории республики. Так, на метеостанции «Малые Дербеты» (север Калмыкии) среднегодовая температура варьируется в диапазоне от 6,6–7,9 °С до 11,1–12,1 °С. На южных станциях значения выше: на «Лагани» — от 8,7–9,6 °С до 12,2–12,7 °С, на «Яшкуле» — от 7,9–9,3 °С до 11,8–12,7 °С. Разница между средними годовыми температурами северных и южных районов достигает 1,7–2,6 °С — этот разрыв обусловлен преимущественно различиями в зимних температурах. Климатические условия севера республики характеризуются более суровым и продолжительным зимним периодом, и менее жарким летом по сравнению с южными районами. При переходе от северных к южным территориям климат становится теплее и менее континентальным — на это указывает снижение температуры самого холодного месяца.

Анализ динамики среднегодовой температуры по данным метеорологических станций «Малые Дербеты», «Элиста», «Яшкуль», «Городовиковск» и «Лагань» выявил устойчивую тенденцию к повышению температурного режима за многолетний период. Согласно аппроксимации линейного тренда, средняя скорость роста среднегодовой температуры составляет 0,3 °С за каждые 10 лет (рис. 1). Наиболее выраженные температурные изменения характерны для южной части республики. Так, по данным метеостанции «Лагань», темп роста температуры достигает +0,36 °С/10 лет — этот показатель объясняет 90 % межгодовой изменчивости температурного ряда (рис. 1Е). Наименее интенсивный рост зафиксирован на метеостанции «Городовиковск»: величина тренда составляет +0,27 °С/10 лет при доле объяснённой межгодовой изменчивости на уровне 62 %.

Потепление наблюдается на всей территории Калмыкии во все сезоны. При этом сезонный анализ выявляет неоднородность температурных изменений: в целом по республике наиболее выраженной особенностью остаётся зимний период, когда температура воздуха фиксируется на 0,43–0,90 °С ниже климатической нормы. Наибольшая интенсивность потепления отмечена в летний сезон – на всех метеостанциях республики темпы роста летних температур достигают 0,052–0,085 °С/10 лет. При этом летние изменения вносят доминирующий вклад в общую изменчивость температурного режима, описывая 84–96 % суммарной дисперсии. Максимальные темпы летнего потепления зарегистрированы на метеостанциях Элиста, Городовиковск, Яшкуль и Лагань.

За многолетний период осреднённые годовые суммы атмосферных осадков по территории Республики Калмыкия варьировали в диапазоне 220,40–506,58 мм. В ходе

многолетних наблюдений зафиксированы существенные межгодовые колебания осадков: максимальное значение — 755 мм — было зарегистрировано в 1952 году на метеостанции Городовиковск (рис. 1A), минимальное — 76 мм — отмечено в 1972 году на метеостанции Лагань (рис. 1E). Анализ трендов выявил неоднородную динамику осадков по территории республики. Значимый рост годовой суммы осадков прослеживается на метеостанциях Городовиковск (22,1 мм/10 лет) и Элиста (10,1 мм/10 лет). На станциях Яшкуль и Лагань также зафиксирована положительная тенденция — темпы прироста составляют 4,5–9,6 мм/10 лет. Уменьшение количества атмосферных осадков отмечено только на метеостанции Малые Дербеты и составляет –9,9 мм/год/10 лет.



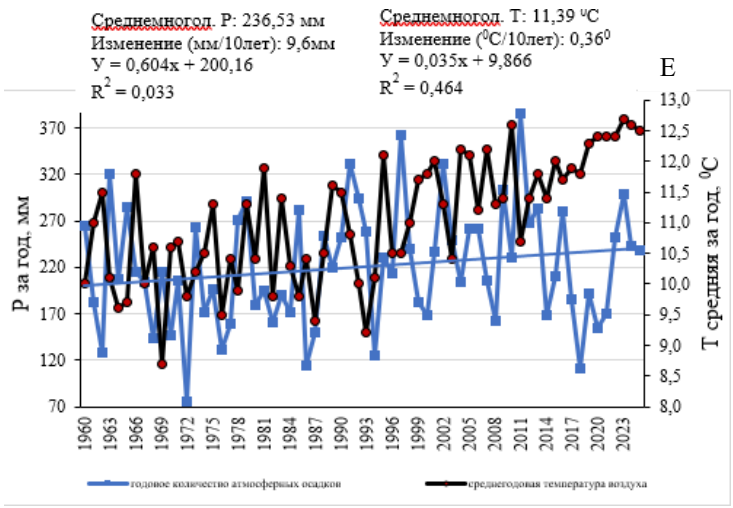


Рис.1 – Динамика годового количества осадков ($Р_{год}$) и среднегодовой температуры воздуха ($Т_{ср.год.}$) за многолетний период на метеорологических станциях:
А – Городовиковск, В – Элиста, С – Малые Дербеты, D – Яшкуль, Е – Лагань

Сезонное распределение осадков по территории республики характеризуется выраженным дефицитом в летний период на фоне увеличения их количества в весенние и осенние месяцы. По данным всех метеостанций, летний дефицит осадков варьирует в диапазоне от 0,67 до −1,32 мм/10 лет. Наиболее выраженный дефицит отмечен на метеостанции Малые Дербеты (−1,08 мм/10 лет), а максимальные значения отрицательного тренда зафиксированы на станции Городовиковск (−1,32 мм/10 лет). В то же время в весеннем сезоне прослеживается тенденция к росту осадков — наиболее существенный прирост наблюдается на метеостанции Элиста: темп увеличения составляет 0,98 мм/10 лет, при этом данный тренд объясняет 57 % дисперсии ряда. В осенний период значимый рост сумм осадков отмечен на метеостанции Городовиковск – тренд превышает 1,12 мм относительно нормы за десятилетие на 15%-м уровне.

Гидротермические характеристики находятся в тесной связи с природной зональностью территории Калмыкии. Согласно данным метеостанции Городовиковск, расположенной на крайнем западе республики в степной зоне (в слабоаридной зоне с NIA = 0,4), экстремально сухие (ГТК < 0,30) и сухие (ГТК = 0,30–0,50) режимы увлажнения за многолетний период фиксировались эпизодически — в 1 % и 8 % случаев соответственно (табл. 1). Преобладающим типом лет являлись засушливые (ГТК> 0,7), на долю которых пришлось 64 % наблюдений (49 лет из 76).

В умеренно аридной зоне гидротермический режим характеризуется меньшей выраженностью засушливых условий по сравнению со слабоаридной зоной. По данным метеостанции Элиста (NIA = 0,4–0,6), годы с разной степенью засушливости фиксировались в 33 % случаев (25 лет из исследуемого периода). При этом отмечается

рост доли лет с очень засушливым (34 %) и сухим (29 %) значениями ГТК. В среднеаридной зоне (NIA = 0,6–0,7), к которой относится большая часть восточной Калмыкии (метеостанции Малые Дербеты, Яшкуль), преобладают сухой (16–26 %) и очень сухой (43–49 %) режимы увлажнения; периоды достаточного увлажнения наблюдаются редко. Высокая повторяемость очень сухих и сухих лет свидетельствует о проявлении пустынно-полупустынных климатических особенностей. Особо выделяется сильно аридная зона на крайнем юго-востоке республики (метеостанция Лагань, NIA > 0,7): здесь зафиксирован наиболее высокий процент очень сухих лет — 36 % (12 лет из 66).

Таблица 1 – Характер гидротермических условий метеорологических станций Калмыкии за многолетний период

Классификация ГТК	Метеорологическая станция				
	Городовиковск	Элиста	Дербеты	Яшкуль	Лагань
< 0,30 очень сухой	1 (1 %)	3 (4 %)	20 (26 %)	12 (16 %)	24 (36 %)
0,3-0,5 сухой	6 (8 %)	22 (29 %)	33 (43 %)	37 (49 %)	33 (50 %)
0,5-0,7 очень засушливый	20 (26 %)	26 (34 %)	18 (24 %)	21 (28 %)	7 (11 %)
> 0,7 засушливый	49 (64 %)	25 (33 %)	5 (7 %)	6 (8 %)	2 (3 %)

Анализ данных метеостанций показывает дифференцированную динамику гидротермических условий по территории республики. Так, на станциях Яшкуль и Лагань прослеживается тенденция к усилению сухости режима — несмотря на незначительный рост годового количества осадков, он компенсируется выраженным повышением температуры воздуха. На метеостанциях Городовиковск и Элиста динамика иная: рост температур сопровождался более существенным увеличением осадков. В результате здесь наблюдается смещение гидротермических условий в сторону большей увлажнённости. С учётом выявленных тенденций многолетний ряд наблюдений позволяет выделить два типа потепления: на станциях Малые Дербеты, Яшкуль и Лагань зафиксировано аридное потепление, тогда как на станциях Городовиковск и Элиста — гумидное.

Согласно данным Управления Федеральной службы государственной статистики по Астраханской области и Республике Калмыкия, на 2025 год из 312,3 тыс. га на долю зерновых и зернобобовых культур приходилось 91,6 % (286,1 тыс. га) (табл. 2). Большую долю посевных площадей Калмыкии занимает возделывание пшеницы озимой и яровой (245,4 тыс. га), высокую эффективность проявляет озимая пшеница в хозяйствах Западной зоны.

Таблица 2 – Посевные площади сельскохозяйственных культур в Республике Калмыкия, тыс. га

Показатель	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Вся площадь	266,4	253,0	283,5	285,8	317,2	304,9	297,8	326,0	327,4	317,4	312,3
Зерновые и зернобобовые	217,6	197,4	238,9	248,8	285,6	276,8	267,6	290,6	297,4	288,0	286,1
Масличные	10,5	13,4	12,1	10,6	80,6	60,8	11,2	18,4	14,9	16,8	12,7
Картофель и овощебахчевые	20,7	20,9	20,2	10,6	10,3	10,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
Кормовые многолетние травы	12,0	12,8	12,2	12,5	9,0	9,3	7,0	7,3	7,3	6,6	6,4
Кормовые однолетние травы на сено	23,5	26,5	18,1	12,2	12,7	11,0	11,1	9,1	7,1	5,6	6,7

Таким образом, современные климатические изменения в Калмыкии характеризуются не только общим потеплением, но и усилением неоднородности гидротермических условий, что требует дифференцированного подхода к управлению земельными ресурсами. Результаты исследования свидетельствуют о необходимости разработки зонально адаптированных мер по управлению агроландшафтами, включающих оптимизацию структуры посевных площадей, внедрение влагосберегающих технологий и усиление мер по предотвращению деградации земель. Это позволит повысить устойчивость сельскохозяйственного производства в условиях изменяющегося климата и сохранить продуктивный потенциал земель Республики Калмыкия.

Список литературы

1. Бакинова Т. И., Дарбакова Н. Е., Дарбакова И. Е., Салаев О. А. Аграрное природопользование в Республике Калмыкия: проблемы и основные направления улучшения ситуации // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. 2018. № 4 (230). С. 97-102.

2. Бакинова Т. И., Джапова Р. Р., Трофимов И. А. и др. Национальная программа действий по борьбе с опустыниванием Республики Калмыкия: монография. Волгоград-Элиста: ФНЦ агроэкологии РАН. 2024. 300 с.

3. Ksenofontov M. Y., Polzikov D. A. On the issue of the impact of climate change on the development of Russian agriculture in the long term // Studies on Russian Economic Development. 2020. No. 31. № 3. Pp. 304-311.

4. Danilov-Danil'yan V. I. Water Resources: A Strategic Factor in the Long-Term Development of the Russian Economy // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2009. № 5. P. 420-428.

5. Шевченко В. А., Дедова Э. Б., Шамсудинов Н. З. и др. Агромелиоративные

приемы восстановления плодородия деградированных и вышедших из оборота сельскохозяйственных земель и пастбищных территорий: монография. Москва: ФГБНУ «ВНИИГиМ имени А. Н. Костякова», 2022. 205 с.

6. Кониева Г. Н., Иванова В. И., Адучиева М. Г. Анализ изменений основных климатических показателей на территории Республики Калмыкия за многолетний период // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование 2023. № 2 (70). С 177-184.

7. Шарко Е. Р. Влияния изменений климата на сельское хозяйство в регионах Российской Федерации // Теоретическая и прикладная экономика. 2022. № 1. С.11-24.

ОСОБЕННОСТИ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ СЕЛЬСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ЯКУТИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

***Лоскин М.И.*[1,2]**
[1] Арктический государственный агротехнологический университет, г. Якутск
[2] ФИЦ Якутский научный центр, г. Якутск
E-mail: melio_lmi@mail.ru

Аннотация: В статье рассматриваются особенности водообеспечения сельских территорий Якутии в условиях изменения климата. Несмотря на обилие водных ресурсов, республика сталкивается с проблемами водообеспеченности территорий из-за природных и геоморфологических условий, а также гидрографических характеристик малых рек, при этом по гидротермическому коэффициенту регион относится к засушливым территориям. Действующая классификация рек Российской Федерации требует уточнения для объектов в зоне многолетней мерзлоты, поскольку она не учитывает специфические показатели северных водотоков, такие как, перемерзание, пересыхание и др. С начала 2000-х годов в Якутии отмечается тенденция увеличения наводнений и аварийных ситуаций на водохозяйственных объектах, что напрямую связано с глобальными климатическими изменениями. Исходя из этого, основным направлением научного обеспечения повышения и стабилизации водообеспечения сельских территорий в криолитозоне должно стать разработка и внедрение климатоадаптивных технологий и мероприятий.
Ключевые слова: водообеспечение территорий, гидротехнические сооружения, изменение климата.

FEATURES OF WATER SUPPLY IN RURAL AREAS OF YAKUTIA IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

***Loskin M.I.*[1,2]**
[1] Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk
[2] Federal Research Center Yakut Scientific Center, Yakutsk
E-mail: melio_lmi@mail.ru

Abstract. This article examines the water supply issues in rural areas of Yakutia in the context of climate change. Despite its abundant water resources, the republic faces water supply challenges due to natural and geomorphological conditions, as well as the hydrographic characteristics of small rivers. The region is classified as arid based on its hydrothermal coefficient. The current classification of rivers in the Russian Federation requires clarification for rivers in permafrost zones, as it does not account for the specific characteristics of northern watercourses, such as freezing, drying out, and other factors. Since the early 2000s, Yakutia has seen an increase in floods and emergency situations at water management facilities, which is directly related to global climate change. Therefore, the development and implementation of climate-adaptive technologies and measures should be the primary focus of scientific support for increasing and stabilizing water supply in rural areas in the cryolithozone.
Keywords: water supply of territories, hydraulic structures, climate change.

Сохранение и укрепление здоровья населения России на уровне, отвечающем критериям цивилизованного общества, представляет собой одну из основных стратегических задач социальной политики государства. Обеспечение каждого жителя Якутии качественной питьевой и технической водой в достаточных количествах и соответствующем качестве является одним из ключевых целевых показателей государственной социальной политики, ориентированной на благосостояние населения [1]. На долю Якутии приходится около половины гидроресурсов Восточной Сибири и более 15 % запасов рек стран СНГ [2]. В республике 23 реки имеют водосборную площадь более 50 тыс. м^2, которые принадлежат бассейнам морей Лаптевых и Восточно-Сибирскому. Ежегодно эти моря пополняются примерно 780 км^3 пресной воды, что составляет примерно четверть стока рек России. При этом, около 70 % от этого объема приносит река Лена [3]. Особенности режима рек тесно связаны с суровыми природно-климатическими условиями, разнообразными физико-географическими и геологическими особенностями, а также многолетнемерзлыми породами, которые влияют на внутрисезонное распределение стока воды и режим питания рек. Среднемноголетние ресурсы речного стока, формирующегося на территории Якутии, составляют 517 км^3. Основная часть стока рек приходится на теплое время года, зимний сток составляет не более 1-10 % от годового стока. Удельные показатели обеспеченности ресурсами стока на 1 км^2 площади составляют 168 тыс. м^3, на душу населения 485 тыс. м^3. Ледостав на реках продолжается 6-8 месяцев, толщина ледяного покрова достигает 3 м.

Основная часть территории Якутии, кроме бассейнов рек Анабар, Оленек, Яна, Индигирка и Колыма, относится к бассейну р. Лена. Все они относятся к категории больших рек. К большим рекам также можно отнести крупные притоки р. Лена – Вилюй и Алдан, которые протекают по нескольким географическим зонам. Если по большим и средним рекам имеются четкие критерии разграничения, то по малым рекам строгих критериев не существует. Ряд авторов определяют понятие малой реки по ее длине. В некоторых определениях длина малых рек указывается как не превышающая 100 километров. Однако, более правильно характеризовать размер реки по площади водосборного бассейна или по среднегодовому расходу воды в устье реки. В различных источниках малые реки определяются как реки с площадью бассейна до нескольких тысяч квадратных километров или со среднегодовым расходом воды в устье до нескольких десятков кубических метров в секунду [4]. Действующая классификация рек в РФ на наш взгляд требует более детальных уточнений по дополнительным параметрам, так как малые реки Центральной Якутии Матта, Суола, Татта и Танда, протяженностью до 400 км, водосборной площадью до 10000 км^2, со среднегодовым расходом до 5 м^3/с,

наравне с р. Амга, протяженностью 1462 км, водосборной площадью 69300 км^2 и среднегодовым расходом 191 м^3/с подходят по параметрам как средние реки. При этом, эти реки с декабря по апрель месяцы местами перемерзают, а в некоторые засушливые годы летом пересыхают.

Одними из отличительных особенностей малых и средних рек Якутии является большое разнообразие уклонов, что обусловлено географическими особенностями региона. Если в равнинных реках уклоны колеблются (реки Татта, Танда, Баяга, Суола Заречной Якутии) до 0,01 %, то в горных реках (река Бэринньэх Арктической зоны) достигают 8 % [5]. Это влияет на скорость течения и гидрологический режим рек, а также на распределение температуры воды. В реках с большим уклоном вода не успевает прогреваться, а в равнинных реках имеет больше времени для нагрева от окружающих пород и атмосферы. Например, если средняя температура воды в мае на равнинной реке Татта (гп. Ытык-Кель, Заречная Якутия) составляет 17,1°С, то на горной реке Томпо (гп. Томпо, Горно-таежная зона) составляет 7,4°С. Таким образом, различные уклоны являются одной из отличительных особенностей малых и средних рек Якутии, которые придают им уникальный гидрологический режим и влияют на их экологические характеристики.

Для оценки водообеспеченности территорий рассмотрим количество населенных пунктов, населения, сельскохозяйственных угодий и животных, норму стока по агроклиматическим зонам Республики Саха (Якутия) (рис.1, таблица 1).

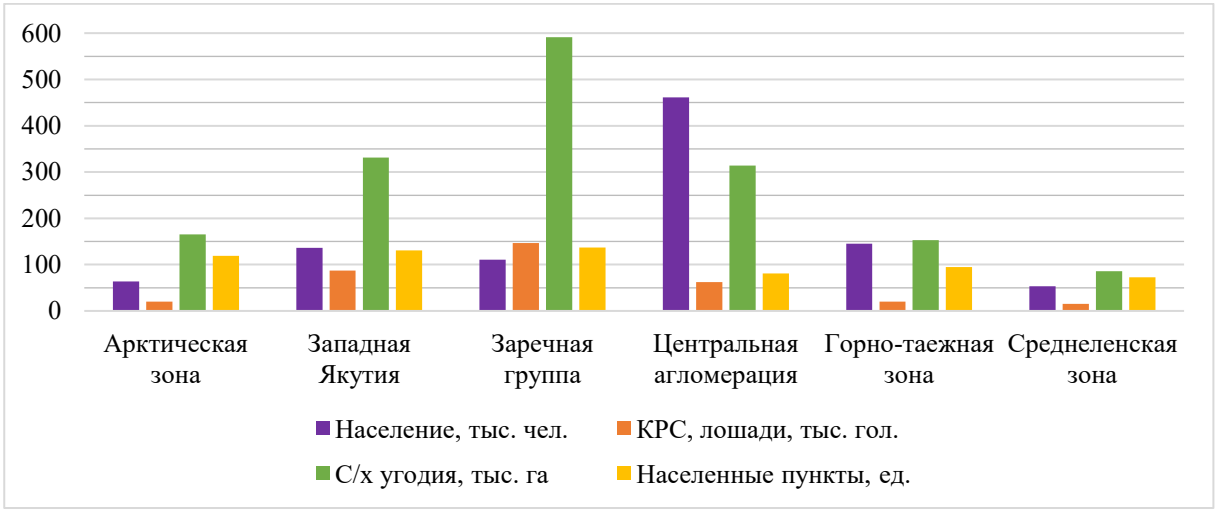


Рис. 1 – Количество населенных пунктов, населения, сельскохозяйственных угодий и животных по зонам Якутии на 01.01.2023 г.

Таблица 1 – Количество населения, населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий и животных Республики Саха (Якутия) на 01.01.2023 г.

Агроклима-тические зоны	Населенные пункты, ед.	Население, тыс. чел.	С/х угодия, тыс. га	КРС, лошади, тыс. гол.	Норма стока, л/с км^2
Арктическая	119	64 (6 %)	165 (10 %)	20 (6 %)	до 15
Западная Якутия	131	163 (16 %)	331 (20 %)	87 (24 %)	до 4
Заречная группа	137	111 (11 %)	591 (37 %)	147 (42 %)	до 0,5
Центральная агломерация	81	464 (47 %)	314 (19 %)	62 (18 %)	до 0,5
Горно-таежная	95	145 (15 %)	153 (9 %)	20 (6 %)	до 20
Среднеленская	73	53 (5 %)	86 (5 %)	15 (4 %)	4-10
ВСЕГО:	636	1000	1640	351	

Как показывают данные, наибольшее количество населенных пунктов и населения в Западной, Заречной, Горно-таежной зонах и Центральной агломерации, а основное количество сельскохозяйственных животных и угодий сосредоточено в Западной, Заречной зонах и Центральной агломерации. При этом, распределение речного стока по территории Якутии, учитывая географическое изменение климатических факторов и рельефа, неоднозначное. Существенное влияние на распределение речного стока оказывает рельеф территорий. Максимумы стока до 15-20 л/с км^2 наблюдаются в Горно-таежной зоне. В Арктической зоне, в северной части Верхоянского хребта величины среднего стока превышают 15 л/с км^2, в среднем течении Яны – 10 л/с км^2. В Бассейне Индигирки – до 8-10 л/с км^2, Колымы – 2-4 л/с км^2. Минимальное значение среднего стока – до 0,5 л/с км^2 и менее наблюдаются в наиболее густонаселенных и агро-ориентированных в Центральной агломерации и Заречной группе в Центрально-якутской низменности. В среднем течении Олекмы (Среднеленская зона) норма стока колеблется в пределах 4-10 л/с км^2. В Западной Якутии не превышают 4 л/с км^2.

Казалось бы, при таком количестве водных ресурсов республика не должна испытывать проблем с водообеспечением территорий. Но, указанная неравномерность стока, а также проведенные исследования показывают неравномерность водообеспеченности территорий. Так, показатели гидротермического коэффициента за последние 50 лет в Заречной, Западной, Центральной и Арктической агроклиматических зонах составляют от 0,36 до 0,50, причем наибольшие показатели наблюдаются в густонаселенных Центральной и Заречной зонах. Проблема водообеспечения особенно

остро стоит в сельских населенных пунктах, расположенных на водоразделах крупных рек Лены и Алдана, вдоль малых рек и котловинах крупных аласов. Существующие озера ввиду отрицательного водного баланса постепенно высыхают, вода в них крайне низкого качества, не отвечает санитарным требованиям, минерализована до 1600 мг/л. В бактериологическом отношении озера характеризуются большим микробным числом. По данным Института здоровья Республики Саха (Якутия) (обследования в 1994-1996 годах) в Чурапчинском районе показатели хронической болезненности органов пищеварения более чем в 10 раз превышали средние показатели по республике. Смертность населения от болезней органов пищеварения по данным Госкомстата Республики Саха (Якутия) в том же улусе выше среднереспубликанского в 1,5 раза (67 против 42,4 на 10000 населения) [5]. Низкое качество питьевой воды издавна является фактором многих заболеваний в республике. За последние несколько лет, общее число случаев острых кишечных инфекций составило 544 на каждые 100 000 человек. Кроме того, уровень заболеваемости бактериальной дизентерией составляет 6,7 случаев на каждые 100 000 населения, что превышает средний показатель Дальневосточного федерального округа 1,6 раз [6].

Одним из вариантов решения вопроса водообеспечения отраслей народного хозяйства могли быть подземные воды. Но из 150 месторождений подземных вод, пригодных для питьевых и технических нужд, с запасами 694 тыс. $м^3$/сут. в настоящее время используется только 41 месторождение (27 %), которые находятся местами в Центральной и в Южной Якутии [7]. Имеются 5 месторождений минеральных вод в Западной, Горно-таежной и Центральной зонах, но их прогнозные ресурсы составляют только 5 тыс. $м^3$/сут. Соответственно, запасы подземных вод не способны полностью решить вопросы водообеспечения населенных пунктов Якутии.

В связи с этим, вопросы водообеспечения сельских территорий в республике решаются в основном объектами сельскохозяйственного водоснабжения и мелиоративными системами на руслах малых рек, построенными в 1970-1980 годах. Так, водообеспечение технической и питьевой водой 86 наслегов в 13 районах Якутии решается объектами сельскохозяйственного водоснабжения и системами лиманного орошения. Одной из отличительных особенностей водообеспечения сельских территорий является то, что 14 систем лиманного орошения (Западная Якутия – 9, Арктическая зона – 2, Центральная агломерация – 1, Заречная группа – 2) помимо орошения сельскохозяйственных угодий задействованы в водообеспечении населенных пунктов из-за отсутствия альтернативных водоисточников водоснабжения. Общий объем воды в водохранилищах составляет приблизительно 730 млн $м^3$. Основная масса

искусственных водохранилищ (93 %) расположена в засушливой Заречной зоне для водообеспечения 66 наслегов (87 %). При этом, эти водохранилища не только обеспечивают водными ресурсами населенные пункты и сельскохозяйственное производство, но также играют существенную роль в создании благоприятного микроклимата, увлажняя территорию.

Обеспеченность водными ресурсами сопряжена с риском негативного воздействия вод на природные ландшафты и объекты экономики. Якутия относится к паводкоопасным регионам Российской Федерации, на ее территории 91 населенный пункт подвержен угрозе затопления, а 46 населенных пунктов – обрушению берегов рек. С начала 2000-х разрушительные паводки наносят значительный ежегодный ущерб населенным пунктам и объектам экономики республики. Основными причинами затоплений населенных пунктов, объектов экономики паводковыми водами с 1998 года являются увеличение водности рек в период весеннего половодья, катастрофические объемы летне-осенних дождевых паводков, недостаточная обеспеченность поселений и объектов экономики сооружениями инженерной защиты, а также несоответствие гидротехнических сооружений к изменившимся гидрологическим характеристикам рек и геокриологическим условиям грунтов оснований сооружений, которые по результатам выборочных исследований являются следствием изменения климата [8, 9]. Потепление климата по всей территории Якутии от 0,59 до 0,82℃ за десятилетие, ее отрицательное влияние на инженерные, в частности, низконапорные гидротехнические сооружения подтверждаются исследованиями, приведенными в [5]. Совокупный ущерб, нанесенный наводнениями в Республике Саха (Якутия) в период с 1998-2022 годы, оценен в 46,8 млрд руб. (в ценах 2022 г.). Для обеспечения гарантированной защиты территорий помимо строительства объектов инженерной защиты населенных пунктов, берегоукрепительных работ, необходимо проведение работ по расчистке, дноуглублению и спрямлению русел малых рек, для чего требуется увеличение объемов финансирования научно-исследовательских работ по исследованию причин наводнений и других видов негативного воздействия паводковых вод, а также работ по разработке и внедрению климатоадаптивных технологий и мероприятий.

Таким образом, рассмотрев состояние водообеспеченности сельских территорий в Республике Саха (Якутия), можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на большое количество рек и озер в республике имеются проблемы водообеспеченности сельских территорий в зависимости от природных и геоморфологических условий территорий, а также гидрографических характеристик малых рек. По гидротермическому коэффициенту регион относится к засушливым

территориям. Имеющиеся запасы подземных вод не отвечают объемам водопотребления. Острой проблемой является не только дефицит, но и низкое качество водных ресурсов, приводящие к заболеваниям внутренних органов, пищеварительной системы и других;

2. Действующая классификация рек в Российской Федерации требует уточнений по водным объектам, расположенным в зоне многолетней мерзлоты, так как существующая классификация рек по протяженности и водосборной площади не учитывает такие показатели рек, как перемерзание, пересыхание и др.;

3. С начала 2000-х годов в Якутии отмечается тенденция увеличения наводнений, количества аварийных ситуаций на водохозяйственных объектах, связанных с изменением климата. Исходя из этого, основным направлением научного обеспечения повышения и стабилизации водообеспечения сельских территорий в криолитозоне Якутии в условиях изменения климата должно стать разработка и внедрение климатоадаптивных технологий и мероприятий.

Список литературы

1. Концепция развития водохозяйственного комплекса Республики Саха (Якутия) до 2020 года. 2010. – 18 с. [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/445034528 (дата обращения: 04.08.2026).

2. Реки Якутии [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Реки_Якутии (дата обращения: 04.08.2026).

3. Агеев, В.И. Водные ресурсы Якутии – проблемы и пути их решения / В.И. Агеев // Наука и техника в Якутии. – 2002. – № 2. – С. 37-39.

4. Малая река [Электронный ресурс]. – URL: http://a-lapin.ru/book5/t-mal-reka.htm (дата обращения: 04.08.2026).

5. Лоскин, М. И. Повышение водообеспеченности сельских территорий в Республике Саха (Якутия) в условиях изменения климата / М. И. Лоскин, Л. В. Кирейчева. – Москва: ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», 2025. – 142 с. – ISBN 978-5-907464-73-5. – DOI 10.37738/VNIIGIM.2025.13.91.001.

6. Григорьев, В.А. Проблемы обеспечения населения Республики Саха (Якутия) питьевой водой и пути решения проблемы / В.А. Григорьев, Р.Р. Ноговицын // Экономические проблемы регионов и отраслевых комплексов [Электронный ресурс] – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-obespecheniya-naseleniya-respubliki-saha-yakutiya-pitievoy-vodoy-i-puti-resheniya-problemy/viewer (дата обращения: 04.08.2026).

7. Скутин, В.И. Состояние запасов и ресурсов подземных вод Якутии и перспективы их использования / В.И. Скутин // Отечественная геология. – 2007. – № 1. – С. 92-94.

8. Бажин, К.И. Обследование оснований гидроузла на р. Матта методом электротомографии (Центральная Якутия) / К.И. Бажин, С.П. Готовцев, И.И. Сыромятников // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. – 2020. – № 4. – С. 55-61. – DOI 10.34078/1814-0998-2020-4-55-61.

9. Чжан, Р.В. К оценке устойчивости ограждающей дамбы г. Якутск / Р.В. Чжан, А.А. Якимов, А.А. Чжан, П.С. Заболотник // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 56-67. – DOI 10.31242/2618-9712-2023-28-1-56-67.

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В ЭПОХУ КЛИМАТИЧЕСКОГО ХАОСА: ИНТЕГРАЦИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, КЛИМАТИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ И БИОИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Лопатина И.Б.
ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Москва
E-mail:lopa200489@yandex.ru

Аннотация: В условиях ускоряющихся климатических изменений традиционные подходы к управлению водными ресурсами демонстрируют свою несостоятельность. Стационарность гидрологических процессов, служившая основой для проектирования водохозяйственных систем на протяжении столетий, утратила свою актуальность. В настоящей статье предлагается концептуальная рамка интегративного управления водными ресурсами, объединяющая три технологические парадигмы: машинное обучение для предиктивной аналитики, климатические сценарии для стратегического планирования и биоинженерные конструкции для адаптивной инфраструктуры. Показано, что синергетическое сочетание этих подходов позволяет преодолеть ограничения каждого из них в отдельности, создавая основу для управления водными ресурсами в условиях глубокой неопределённости.

Ключевые слова: управление водными ресурсами, машинное обучение, климатические сценарии, биоинженерия, адаптивное управление.

WATER MANAGEMENT IN AN AGE OF CLIMATE CHAOS: INTEGRATING MACHINE LEARNING, CLIMATE SCENARIOS AND BIOENGINEERING DESIGNS

Lopatina I.B.
FSBIS "FSCC VNIIGiM named after A.N. Kostyakov"
E-mail:lopa200489@yandex.ru

Abstract: Under accelerating climate change, traditional approaches to water resources management are proving inadequate. The stationarity of hydrological processes, which has served as the foundation for water management system design for centuries, has lost its relevance. This paper proposes a conceptual framework for integrated water resources management that combines three technological paradigms: machine learning for predictive analytics, climate scenarios for strategic planning, and bioengineered constructs for adaptive infrastructure. It is shown that the synergistic combination of these approaches allows overcoming the limitations of each individual approach, creating a basis for water resources management under deep uncertainty.

Keywords: water resources management, machine learning, climate scenarios, bioengineering, adaptive management.

Введение

Изменение климата приводит к росту частоты и интенсивности экстремальных гидрологических явлений-наводнений, засух, резких колебаний стока рек. Эти процессы создают серьёзные вызовы для систем водоснабжения, ирригации, энергетики и защиты территорий. Традиционные методы управления водными ресурсами зачастую оказываются недостаточно гибкими для реагирования на климатический хаос, характеризующийся высокой степенью неопределённости и нелинейностью процессов [1]. Современные технологии позволяют существенно повысить адаптивность систем водопользования. В частности, сочетание прогнозных климатических моделей, алгоритмов машинного обучения и природосообразных инженерных решений открывает новые возможности для устойчивого управления водными ресурсами. Такой интегрированный подход позволяет не только прогнозировать изменения гидрологического режима, но и проектировать адаптивные инфраструктурные решения, учитывающие будущие климатические условия [2].

Цель данной статьи: обосновать необходимость интеграции машинного обучения, климатических сценариев и биоинженерных конструкций в практику управления водными ресурсами и продемонстрировать примеры успешной реализации такого подхода в России и за рубежом.

Обсуждение. Климатический хаос и его влияние на водные ресурсы

Климатический хаос проявляется в виде резких отклонений от средних многолетних значений температуры и осадков, учащения экстремальных погодных явлений и изменения сезонной динамики стока. В России эти тенденции особенно заметны в южных и сибирских регионах, где наблюдаются как аномальные паводки, так и продолжительные засухи [3].

Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), в XXI веке ожидается дальнейшее усиление гидрологической изменчивости, что потребует адаптации существующих систем водопользования [4]. В частности, прогнозируется увеличение частоты паводков в северных и горных районах, а также усиление дефицита водных ресурсов в аридных и полуаридных зонах.

Для учёта этих тенденций в управлении водными ресурсами необходимо использовать сценарное планирование, основанное на климатических моделях. Климатические сценарии, такие как RCP (Representative Concentration Pathways) и SSP (Shared Socioeconomic Pathways), позволяют оценить возможные изменения гидрологического режима при различных траекториях антропогенного воздействия и социально-экономического развития [5].

Роль машинного обучения в управлении водными ресурсами

Машинное обучение (ML) становится важным инструментом для анализа больших объёмов гидрометеорологических данных и прогнозирования гидрологических процессов. Алгоритмы ML позволяют выявлять скрытые закономерности в данных, которые трудно обнаружить традиционными статистическими методами [6].

В практике управления водными ресурсами методы машинного обучения применяются для:

1) прогнозирования речного стока и уровня воды;

2) оценки рисков наводнений и засух;

3) оптимизации режимов работы водохранилищ и насосных станций;

4) выявления аномалий в работе гидротехнических сооружений.

Разнообразие задач, решаемых с помощью ML, и соответствующие методы представлены в таблице 1, включая примеры из российской и зарубежной практики.

Таблица 1 - Примеры применения ML-моделей для прогнозирования гидрологических параметров

Задача	Метод ML	Входные данные	Регион/проект	Источник
Прогнозирование паводков	Искусственные нейронные сети	Гидропосты, осадки, температура, спутниковые данные	Сибирь, Дальний Восток (РФ)	Георгиевский, Шалыгин, 2019
Оценка рисков наводнений	Градиентный бустинг	Цифровая модель рельефа, данные ливнёвок, прогнозы осадков	Городские системы США	EPA, 2020
Оптимизация режимов водохранилищ	Обучение с подкреплением	Прогноз притока, спрос на воду, энергетические графики	Бассейн Рейна	Rhine Commission, 2021
Выявление аномалий в работе сооружений	Автоэнкодеры, PCA	Телеметрия КИА, вибрация, уровень, расход	Пилотные гидроузлы РФ	Внутренние отчёты Росводресурсы

Например, в России разработаны модели на основе искусственных нейронных сетей для прогнозирования паводков на реках Сибири и Дальнего Востока [7]. Эти модели используют данные гидрологических постов, спутниковые наблюдения и прогнозы погоды, что позволяет повысить точность прогнозов и своевременно принимать меры по защите населения и инфраструктуры.

За рубежом методы машинного обучения активно применяются в системах раннего предупреждения о наводнениях. Так, в США Агентство по охране окружающей среды (EPA) использует алгоритмы ML для прогнозирования качества воды и оценки рисков загрязнения водоёмов [8]. В Европе аналогичные системы внедряются в рамках программы Horizon 2020, направленной на повышение устойчивости городских водных систем [9].

Биоинженерные конструкции как элемент адаптивного управления

Биоинженерные конструкции — это инженерные решения, основанные на использовании живых организмов или природных материалов для стабилизации берегов, фильтрации воды и восстановления экосистем. Такие конструкции обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными жёсткими инженерными решениями: они более устойчивы к изменениям гидрологического режима, способствуют восстановлению биоразнообразия и имеют меньший экологический след [10].

Примеры биоинженерных решений включают:

- укрепление берегов с помощью посадки влаголюбивых растений;
- создание фильтрующих полос из травянистых растений для очистки поверхностного стока;
- использование геотекстильных материалов и растительных матов для предотвращения эрозии;
- восстановление водно-болотных угодий как естественных регуляторов стока.

В России биоинженерные методы применяются при восстановлении малых рек и озёр, а также при рекультивации нарушенных земель [11]. Например, в рамках проектов по восстановлению водотоков в Центральной России используются комбинированные решения, сочетающие укрепление берегов каменными набросками и посадку прибрежной растительности [12].

За рубежом биоинженерные подходы широко применяются в городском планировании и управлении ливневыми стоками. В Нидерландах, где значительная часть территории находится ниже уровня моря, биоинженерные решения интегрируются в общую стратегию защиты от наводнений [13]. В США программы по восстановлению прибрежных экосистем включают создание искусственных рифов и восстановление мангровых лесов, что способствует снижению рисков штормовых нагонов и эрозии побережья [14].

Интеграция подходов: сценарии, ML и биоинженерия

Интеграция климатических сценариев, машинного обучения и биоинженерных конструкций позволяет создать адаптивную систему управления водными ресурсами,

способную реагировать на изменяющиеся условия. Такой подход включает следующие этапы:

Предлагаемая архитектура интегрированной системы представлена на рисунке 1 и включает сбор данных, прогнозную аналитику и адаптивное проектирование с обратной связью по результатам мониторинга

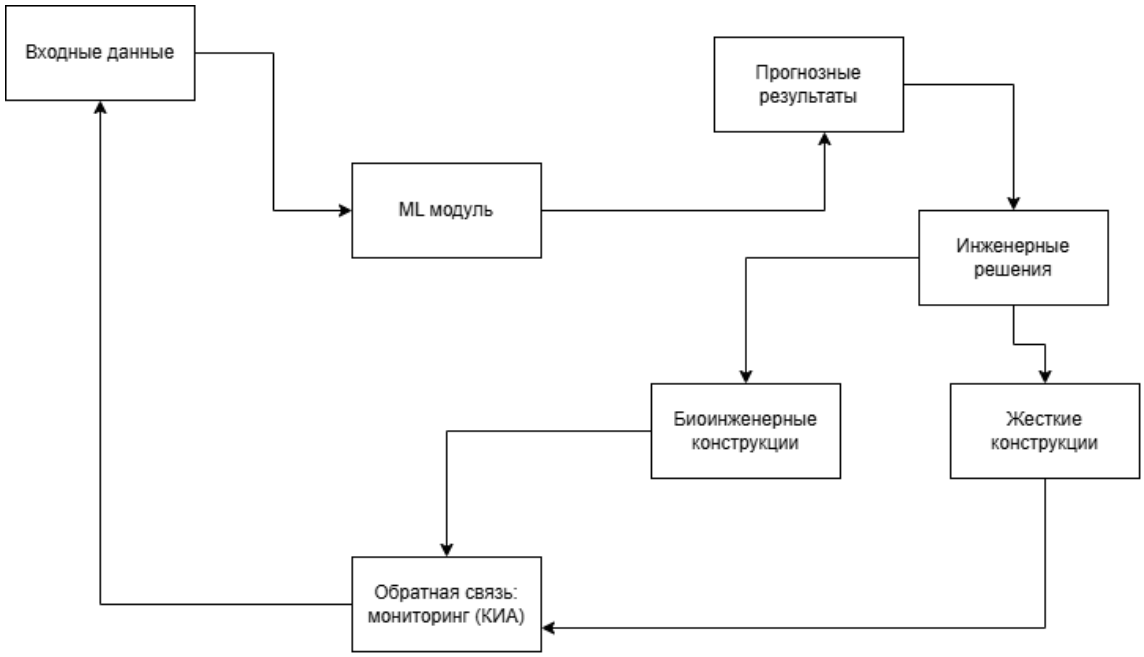


Рис. 1 - Концептуальная схема интегрированной системы управления водными ресурсами на основе климатических сценариев, машинного обучения и биоинженерных конструкций

1. **Разработка климатических сценариев** - оценка возможных изменений гидрологического режима на основе глобальных и региональных климатических моделей.

2. **Прогнозирование гидрологических процессов** - использование алгоритмов машинного обучения для прогнозирования стока, уровня воды и рисков наводнений.

3. **Проектирование адаптивных решений** - разработка инженерных и биоинженерных мер, учитывающих прогнозные изменения климата и гидрологического режима.

4. **Мониторинг и корректировка** - непрерывный сбор данных и корректировка управленческих решений на основе новых наблюдений и прогнозов.

Примером успешной интеграции этих подходов является проект по управлению водными ресурсами в бассейне реки Волги, где используются климатические сценарии для оценки будущих изменений стока, алгоритмы машинного обучения для прогнозирования паводков и биоинженерные методы для восстановления прибрежных экосистем [15].

За рубежом аналогичные подходы применяются в управлении водными ресурсами в бассейне реки Рейн, где интегрированные модели позволяют оптимизировать режимы работы водохранилищ и минимизировать риски наводнений [16].

Практические рекомендации и перспективы развития

Для успешной интеграции машинного обучения, климатических сценариев и биоинженерных конструкций в практику управления водными ресурсами рекомендуется:

- развивать системы сбора и обмена гидрометеорологическими данными, включая данные дистанционного зондирования и автоматизированных гидропостов;
- внедрять цифровые платформы для интеграции данных и поддержки принятия управленческих решений;
- разрабатывать адаптивные стандарты проектирования гидротехнических и биоинженерных сооружений, учитывающие прогнозные изменения климата;
- повышать квалификацию специалистов в области гидрологии, климатологии и цифровых технологий.

Перспективы развития данного направления связаны с дальнейшим совершенствованием методов машинного обучения, повышением точности климатических моделей и развитием биоинженерных технологий. Важную роль будет играть международное сотрудничество и обмен опытом между странами, сталкивающимися с аналогичными проблемами.

Заключение

Интеграция климатических сценариев, методов машинного обучения и биоинженерных конструкций формирует эффективную и адаптивную систему управления водными ресурсами, способную функционировать в условиях высокой климатической неопределённости. Ключевым фактором её работоспособности выступает замкнутый цикл принятия решений: от сценарного прогнозирования через ML к реализации сбалансированных инженерных мер и обратно - через мониторинг средствами КИА к обновлению прогнозных моделей. Практическая реализация такого подхода в российских и зарубежных бассейнах подтверждает его потенциал для снижения рисков наводнений и засух, повышения устойчивости инфраструктуры и сохранения экосистем. Дальнейшее развитие требует не только технологического совершенствования, но и институциональных изменений - включая стандартизацию данных, адаптацию норм проектирования и подготовку специалистов нового профиля. Только комплексная работа науки, практики и регуляторов позволит обеспечить

безопасное и устойчивое водопользование в эпоху климатического хаоса. Управление водными ресурсами в условиях климатического хаоса требует комплексного подхода, основанного на интеграции современных технологий и природосообразных решений. Сочетание климатических сценариев, методов машинного обучения и биоинженерных конструкций позволяет повысить адаптивность систем водопользования и минимизировать риски, связанные с изменением климата. Реализация такого подхода требует координации усилий учёных, инженеров, управленцев и представителей общественности, а также поддержки со стороны государства и международного сообщества.

Список литературы

1. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. (eds.). Cambridge University Press, 2021.

2. Gleick P. H. Water in a Changing Climate // Climatic Change. 1989. Vol. 15. P. 131–151.

3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014.

4. IPCC. Summary for Policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. 2021.

5. Van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M. et al. The Representative Concentration Pathways: an overview // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 5–31.

6. Solomatine D. P., Ostfeld A. Data-driven modelling: some past experiences and new challenges in hydrology and water resources // Hydrological Sciences Journal. 2008. Vol. 53, No. 4. P. 798–810.

7. Георгиевский Ю. М., Шалыгин А. Л. Прогнозирование паводков с использованием нейронных сетей // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 45–53.

8. U.S. Environmental Protection Agency. Using Machine Learning for Water Quality Monitoring and Prediction. EPA Report, 2020.

9. Horizon 2020. Urban Water Management and Climate Adaptation Projects. European Commission, 2021.

10. Mitsch W. J., Gosselink J. G. Wetlands. 4th ed. Wiley, 2007.

11. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году». М.: Минприроды России, 2023.

12. Методические рекомендации по применению биоинженерных методов для восстановления водотоков. М.: ФГБУ «РосНИИВХ», 2021.

13. Delta Programme. Adaptive Delta Management: A Strategy for Flood Risk and Freshwater Supply in the Netherlands. Ministry of Infrastructure and Water Management, 2019.

14. U.S. Army Corps of Engineers. Ecosystem Restoration and Coastal Resilience Projects. Technical Report, 2020.

15. Проект «Управление водными ресурсами бассейна реки Волги»: отчёт о результатах. М.: Росводресурсы, 2022.

16. Rhine Commission. Integrated Water Resources Management in the Rhine Basin: Lessons and Perspectives. Technical Report, 2021.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОННОГО ПОЛОТНА ДЛЯ ОБЛИЦОВКИ ГРУНТОВЫХ ИРРИГАЦИОННЫХ КАНАЛОВ: ПРЕИМУЩЕСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Петров А.А.[1], *Сабиров М.Р*[2].
[1] Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан, г. Ташкент
[2]АО «O'ZSUVLOYIHA», г.Ташкент
E-mail: Apetrovniiivp@mail.ru

Аннотация: В условиях возрастающего дефицита водных ресурсов и острой необходимости повышения коэффициента полезного действия (КПД) оросительных систем Республики Узбекистан, поиск эффективных и экономически выгодных технологий противофильтрационной защиты грунтовых каналов становится одной из приоритетных задач мелиоративной науки. Данная обзорная статья посвящена анализу применения инновационного материала — бетонного полотна — в качестве альтернативы традиционным бетонным облицовкам. В работе рассмотрены физико-механические свойства материала, технология его монтажа, а также преимущества и ограничения использования на основе мирового опыта и результатов недавних полевых исследований в Узбекистане. Особое внимание уделяется его гибкости, скорости укладки, ремонтопригодности и значительному экономическому эффекту, что делает его перспективным решением для реконструкции и строительства внутрихозяйственных оросительных сетей.

Ключевые слова: бетонное полотно, противофильтрационная защита, оросительные каналы, гибкие облицовки, фильтрационные потери, технологии строительства.

APPLICATION OF CONCRETE CANVAS FOR LINING EARTHEN IRRIGATION CANALS: ADVANTAGES AND PROSPECTS IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Petrov, A.A.[1], *Sabirov M.R.*
[1] *Research Institute of Irrigation and Water Problems of the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan, Tashkent*
E-mail: Apetrovniiivp@mail.ru
[2]*AO «O'ZSUVLOYIHA»*

Abstract: Given the growing shortage of water resources and the urgent need to improve the efficiency of irrigation systems in the Republic of Uzbekistan, the search for effective and cost-effective technologies for anti-seepage protection of earthen canals has become one of the priority tasks of land reclamation science. This review article is devoted to analyzing the application of an innovative material—concrete sheeting—as an alternative to traditional concrete linings. The paper examines the material's physical and mechanical properties, its installation technology, as well as the advantages and limitations of its use, based on global experience and the results of recent field studies in Uzbekistan. Particular attention is paid to its flexibility, speed of installation, maintainability, and significant economic benefits, which make it a promising solution for the reconstruction and construction of on-farm irrigation networks.

Keywords: concrete slab, anti-seepage protection, irrigation channels, flexible linings, seepage losses, construction technologies.

Республика Узбекистан, расположенная в аридной зоне, характеризуется острым дефицитом водных ресурсов, что делает проблему их рационального использования критически важной для устойчивого развития сельского хозяйства. Одним из основных источников неэффективных потерь воды является фильтрация из грунтовых оросительных каналов, которая, по некоторым оценкам, достигает 30% от общего объема транспортируемой воды. Традиционные методы противофильтрационной защиты, преимущественно основанные на монолитном бетонировании, хотя и эффективны, являются ресурсоемкими, трудоемкими и требуют значительных капитальных затрат.

В связи с этим, внедрение альтернативных технологий, способных обеспечить надежную гидроизоляцию при меньших материальных и временных затратах, является актуальной научной и практической задачей. Среди таких технологий особого внимания заслуживает бетонное полотно — инновационный рулонный материал, который сочетает в себе преимущества гибкости геосинтетиков и прочности бетона. Данная статья представляет обзор свойств, технологии применения и потенциала бетонного полотна для облицовки ирригационных каналов.

Структура и свойства бетонного полотна

Бетонное полотно представляет собой трехслойный композитный материал. Верхний и нижний слои выполнены из проницаемого геотекстиля, между которыми заключена сухая цементная смесь. Нижний слой, как правило, оснащен водонепроницаемой ПВХ-мембраной, которая выполняет функцию первичного гидроизоляционного барьера. При контакте с водой цемент в структуре полотна гидратируется, и материал затвердевает, формируя прочный, армированный и водонепроницаемый бетонный слой, точно повторяющий рельеф основания.

Основные физико-механические свойства материала включают прочность на сжатие не менее 40 МПа, высокую устойчивость к истиранию и морозостойкость (не менее 300 циклов), что подтверждает его пригодность для эксплуатации в суровых климатических условиях, включая резко континентальный климат Узбекистана . Важной характеристикой является его высокая абразивная стойкость, которая значительно выше, чем у обычного бетона, что критично для каналов с высокими скоростями потока и наличием донных наносов.

Технология применения и логистические преимущества

Одним из ключевых преимуществ бетонного полотна является простота и высокая скорость монтажа, что кардинально отличает его от традиционных методов.

Процесс укладки не требует использования бетоносмесительного оборудования, опалубки и сложного виброуплотнения. Полотно раскатывается по подготовленному грунтовому основанию, отдельные полотна укладываются внахлест и фиксируются различными способами (болтами, герметиками), после чего материал просто смачивается водой.

Таблица 1 - Сравнительный анализ, приведенный в таблице, наглядно демонстрирует технологические преимущества бетонного полотна.

Показатель	Бетонное полотно	Традиционная бетонная облицовка
Скорость укладки (м²/день)	до 800	до 80
Набор прочности (часов)	24	72
Требования к технике/персоналу	Минимальные	Максимальные
Вес 1 м²	~10 кг	~200 кг (для бетона)

Эти факторы позволяют сократить сроки строительства в 5-10 раз, снизить трудозатраты и использовать материал в условиях ограниченного доступа, где работа с тяжелой техникой затруднена или невозможна. С экономической точки зрения, несмотря на более высокую стоимость самого материала, общие затраты на проект часто оказываются ниже благодаря экономии на логистике, оплате труда и аренде техники.

Оценка гидротехнической эффективности

Основная цель применения бетонного полотна — значительное сокращение фильтрационных потерь. Лабораторные исследования и натурные испытания демонстрируют его высокую эффективность. Так, в одном из исследований водопроницаемость бетонного полотна была в 4 раза ниже, чем у традиционной бетонной облицовки.

Расчеты и данные полевых измерений показывают, что фильтрационные потери в каналах, облицованных бетонным полотном, минимальны. Например, потеря воды на фильтрацию в канале с бетонопленочной облицовкой (конструктивно близкой к бетонному полотну) на опытных участках в Узбекистане составила всего 0,24-0,36 л/(с·км), в то время как в земляном русле она достигала 22 л/(с·км), что означает сокращение потерь в десятки раз. Гибкость материала позволяет ему адаптироваться к деформациям основания без образования критических трещин, что является слабым местом монолитного бетона, и, по данным производителей, способствует сохранению целостности облицовки на протяжении десятилетий.

Ограничения и рекомендации по применению

Несмотря на значительные преимущества, применение бетонного полотна имеет определенные ограничения, выявленные в ходе исследований. Слабым звеном в

конструкции являются стыки между отдельными полотнами. Практика показывает, что для обеспечения полной герметичности необходимо применение специальных методов крепления и герметизации, например, двойного крепления болтами или использования дополнительных слоев гидроизоляционных материалов поверх нахлеста. Также материал требует защиты от случайных механических повреждений в процессе монтажа и эксплуатации, а его ремонтопригодность, хотя и выше, чем у пленочных покрытий, но может быть сложнее по сравнению с локальным ремонтом монолитного бетона. Тем не менее, материал отлично зарекомендовал себя в условиях всех климатических зон и устойчив к ультрафиолету.

Заключение

Бетонное полотно является высокотехнологичным и эффективным решением для противофильтрационной облицовки открытых грунтовых оросительных каналов. Его ключевые преимущества — высокая скорость монтажа, простота укладки, гибкость и адаптивность к деформациям, а также значительное сокращение фильтрационных потерь — делают его привлекательной альтернативой традиционным бетонным работам, особенно для внутрихозяйственных сетей. Для условий Республики Узбекистан, где остро стоит проблема водосбережения, внедрение данной технологии может обеспечить существенный экономический и экологический эффект. Успешный опыт применения в мировой практике, в том числе на крупных ирригационных проектах, подтверждает его перспективность. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование технологии герметизации стыков, адаптацию рецептур под местные сырьевые ресурсы и разработку методических рекомендаций для массового применения в республике.

Литература

1. Научно-технический отчет НИИ Ирригации и водных проблем «Экспериментальное внедрение современных технологий повышения противофильтрационной защиты внутренних оросительных сетей в условиях Республики Узбекистан», Ташкент, 2026 г.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВНУТРИГОДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА РЕК БАССЕЙНА ВЕРХНЕЙ ОБИ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Самойлова С.Ю.
Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, г. Барнаул
e-*mail: bastet@iwep.ru*

Аннотация. Проанализирована многолетняя изменчивость внутригодового распределения стока рек - притоков I порядка р. Оби в границах Верхнеобского бассейнового округа. В качестве основного показателя использован коэффициент естественной зарегулированности стока, рассчитанный по среднемесячным расходам воды за период 1960–2020 гг. За исследуемый период на большинстве рек зафиксирован рост коэффициентов зарегулированности, в большинстве случаев значимый на 1% уровне. Для левобережных притоков лесоболотной зоны значимых изменений не наблюдается.
Ключевые слова: Верхняя Обь, коэффициент естественной зарегулированности, водный режим, климатические изменения

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF INTRA-ANNUAL RUNOFF DISTRIBUTION IN THE UPPER OB RIVER BASIN DUE TO CLIMATE CHANGE

Samoilova S.Yu.
Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul
e-mail: bastet@iwep.ru

Abstract. The long-term variability of the intra-annual runoff distribution in the rivers - first-order tributaries of the Ob River within the boundaries of the Upper Ob Basin District - was analysed. The natural flow regulation coefficient, calculated based on data on average monthly water discharges for the period 1960–2020, was used as the main indicator. Over the study period, an increase in the regulation coefficients was recorded for most rivers; in most cases, this increase was significant at the 1 % significance level. No significant changes were observed for the left-bank tributaries, where the proportion of wetlands is about 40 %.
Keywords: Upper Ob, natural flow regulation coefficient, water regime, climate change.

Влияние климатических изменений на водный режим рек умеренного пояса проявляется, в первую очередь, в перераспределении стока между гидрологическими сезонами. Характерно ослабление сезонности и рост естественной зарегулированности стока в высоких (выше 50°) северных широтах [1]. Этот процесс связан, в первую очередь, с увеличением зимнего стока рек в результате роста температур и сокращения периода залегания снежного покрова. В качестве интегрального показателя естественной внутригодовой изменчивости стока традиционно используется коэффициент естественной зарегулированности (КЕЗ), характеризующий долю базисного стока в годовом.

Данное исследование посвящено оценке многолетней изменчивости показателей естественной зарегулированности стока рек бассейна Верхней Оби в границах Верхнеобского бассейнового округа (рис. 1). Анализировались притоки р. Оби I порядка, по площади бассейна, относящиеся к средним и большим рекам.

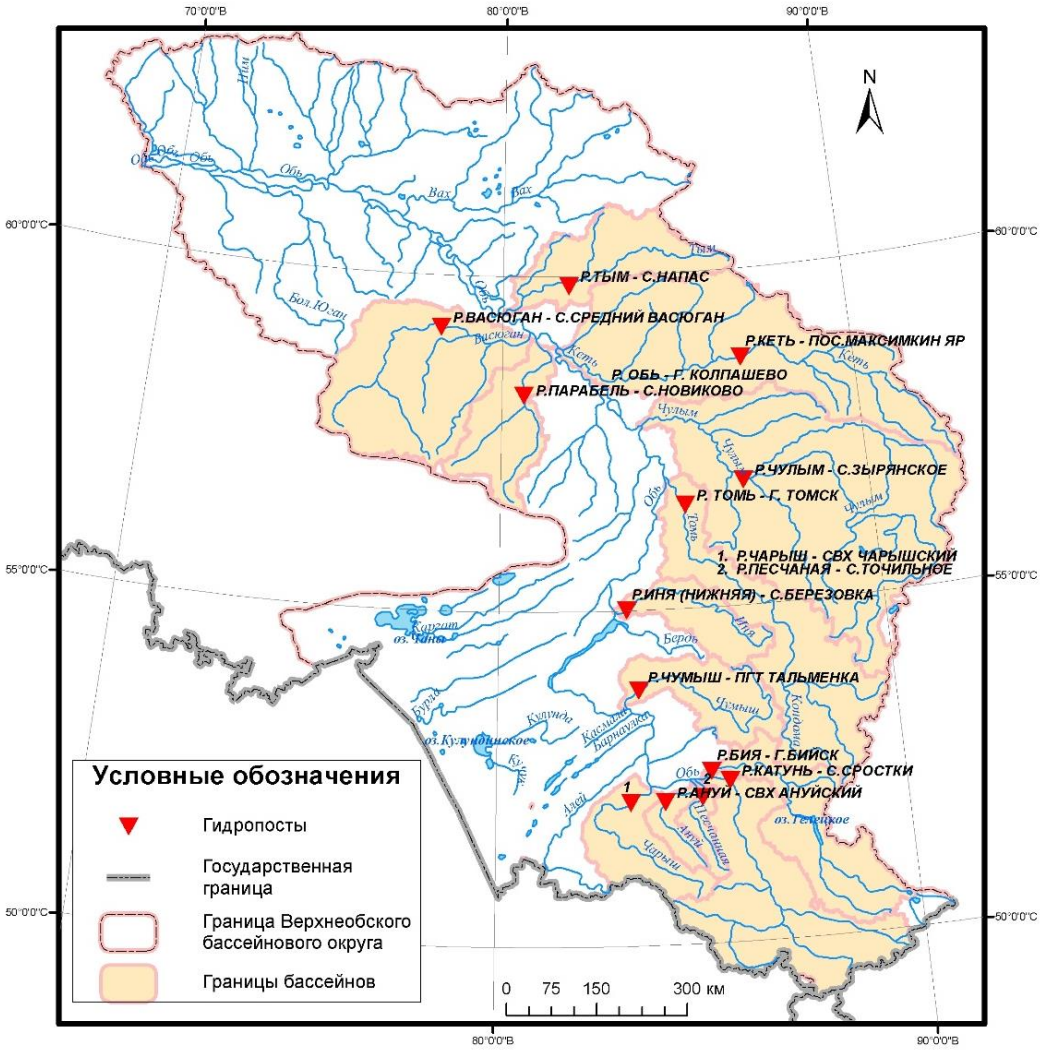


Рис. 1 – Объекты исследования

Разнообразие типов водного режима исследуемых рек определяется как широтной зональностью в пределах Западно-Сибирской равнины, так и высотной поясностью Алтае-Саянской горной страны на юге и юго-востоке округа. Бассейны рек, расположенных в пределах таежной (лесной и лесоболотной) зоны (Кеть, Парабель, Васюган, Тым) имеют западносибирский тип водного режима с невысоким растянутым половодьем и повышенным летне-осенним стоком. Реки, бассейны которых расположены в пределах лесостепной зоны и на невысоких отрогах Салаиро-Кузнецко-Алатауссской зоны Алтае-Саянской горной страны (Чумыш, Иня), имеют черты восточноевропейского типа: высокое весеннее половодье, низкую летнюю и зимнюю межень с несколько повышенным стоком осенью. Реки, стекающие с северного макросклона Алтайской горной области, относятся к алтайскому типу водного режима с растянутым, многопиковым половодьем, вызванным неравномерным таянием снега в разных высотных зонах. Крупные реки (Бия, Катунь, Томь, Чулым и сама Обь) имеют

полизональный режим, при этом у Бии, Катуни и Томи преобладают черты Алтайского типа, а у Чулыма – Западносибирского (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристика исследуемых рек и их бассейнов

Река-пост	Площадь бассейна до створа гидропоста, км^2	Среднегодовой расход воды,	Зональная область*	Тип водного режима (по Б.Д. Зайкову)
Бия - г. Бийск	36900	477	Алтайская горная	Алтайский
Катунь - с. Сростки	58400	629	Алтайская горная	Алтайский
Песчаная - с. Точильное	4720	32,4	Алтайская горная /степная	Алтайский
Ануй - свх. Ануйский	4870	31,1	Алтайская горная /степная	Алтайский
Чарыш - свх. Чарышский	20700	194	Алтайская горная /степная	Алтайский
Чумыш - пгт Тальменка	20600	144	Салаиро-Кузнецко-Алатаусская горная /лесостепная	Восточноевропейский
Иня - с. Березовка	17300	52	Салаиро-Кузнецко-Алатаусская горная /лесостепная	Западносибирский (с чертами восточноевропейского)
Томь - г. Томск	57000	1090	Салаиро-Кузнецко-Алатаусская горная /таежная	Алтайский
Чулым - с. Зырянское	92500	550	Таежная/Салаиро-Кузнецко-Алатаусская горная /лесостепная	Западносибирский
Кеть - пос. Максимкин яр	38400	248	Таежная	Западносибирский
Парабель - с. Новиково	17900	76	Таежная	Западносибирский
Васюган - с. Средний Васюган	31700	164	Таежная	Западносибирский
Тым - с. Напас	24500	190	Таежная	Западносибирский
Примечание: * – указаны преобладающие (занимающие более 90% площади бассейна) одна или несколько зон				

КЕЗ определялся как отношение площади гидрографа, расположенной ниже ординаты среднегодового расхода (базисный сток), к общей площади гидрографа (годовой сток). В качестве исходной информации использованы данные о среднемесячных расходах воды с 1960 по 2020 гг. с минимальными пропусками в рядах наблюдений. Сравнительный анализ КЕЗ, рассчитанных по среднесуточным и по среднемесячным расходам воды, представленный в работах [2, 3], показал, что погрешность расчёта при использовании среднемесячных данных не превышает 10%, а для рек с высокой степенью естественной зарегулированности – не более 3%. Многолетняя изменчивость КЕЗ и среднемесячных расходов воды оценивалась с

помощью линейных трендов. Оценка значимости трендов выполнялась по соотношению коэффициента корреляции r и его средней квадратичной ошибке σ_r: при $r/\sigma_r > 2$ тренд достоверен при уровне значимости 5%; при $r/\sigma_r > 3$ тренд значим при уровне значимости 1% [4].

Результаты расчетов КЕЗ показали, что реки бассейна Верхней Оби характеризуются высокой степенью естественной зарегулированности стока – во всех случаях среднемноголетний $КЕЗ_{ср}$ составляет более 0,5 (табл. 2). Минимальные значения КЕЗ - 0,51-0,54 с максимальными коэффициентами вариации у рек Чумыш и Иня, имеющих характерные черты восточноевропейского типа водного режима. Наименее выражена изменчивость стока как во внутригодовом, так и в многолетнем масштабе у рек с алтайским типом (р. Ануй, Песчаная и др.) и правобережных притоков таежной зоны с западносибирским типом водного режима (Тым, Кеть): КЕЗ от 0,6 до 0,68, при коэффициентах вариации не более 8,8% (см. табл. 2).

Таблица 2 – Коэффициенты естественной зарегулированности исследуемых рек и их изменчивость за период 1960-2020 гг.

Река	Пост	$КЕЗ_{ср}$	C_v	Коэффициент корреляции тренда, r	r/σ_r
Бия	Бийск	0,65	5,9	0,25	2
Катунь	*Сростки*	*0,63*	*6*	*0,39*	*3,5*
Песчаная	Точильное	0,64	8,8	0,31	2,6
Ануй	*Ануйский*	*0,67*	*8,1*	*0,44*	*4,1*
Чарыш	Чарышский	0,61	8,4	0,18	1,4
Чумыш	*Тальменка*	*0,54*	*12,6*	*0,53*	*5,6*
Иня	*Березовка*	*0,51*	*15,4*	*0,75*	*13*
Томь	Томск	0,55	10	0,3	2,5
Чулым	*Зырянское*	*0,6*	*10,3*	*0,51*	*5,3*
Кеть	*Максимкин яр*	*0,62*	*9,2*	*0,38*	*3,5*
Парабель	Новиково	0,61	15,3	0,04	0,3
Васюган	Средний Васюган	0,56	11,2	0,1	0,8
Тым	*Напас*	*0,66*	*8*	*0,5*	*5,1*
Примечание: значимые тренды выделены цветом; тренды, значимые на 1% уровне, выделены курсивом.					

На большей части исследуемых рек за период 1960-2020 гг. наблюдается рост КЕЗ, причем тренды в большинстве случаев достоверны на 1% уровне. Максимальный рост КЕЗ характерен для рек Иня (рис. 2) и Чумыш. Увеличение естественной зарегулированности стока р. Иня связано с ростом расходов воды как в зимнюю, так и в летне-осеннюю межень на фоне относительной стабильности половодья. Положительные тренды, достоверные на 1% уровне значимости, характерны для всех

месяцев года, за исключением периода с апреля по июнь. На р. Чумыш снижение внутригодовой изменчивости стока, вызванное ростом зимних меженных расходов, усиливается за счет уменьшения водности половодья.

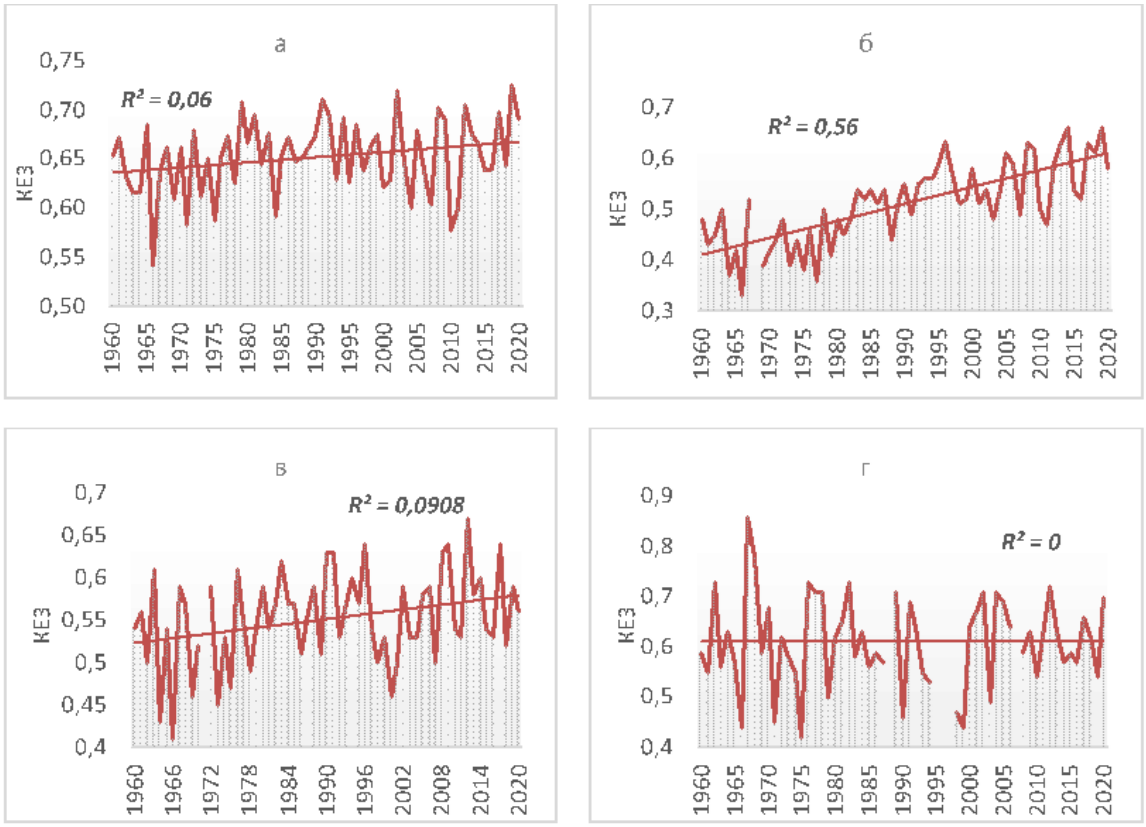


Рис. 2 – Изменение коэффициентов естественной зарегулированности стока с 1960 по 2020 г.: а – р. Бия – г. Бийск; б – р. Иня – с. Березовка; в – р. Томь – г. Томск; г – р. Парабель – с. Новиково

В целом, для большинства рек наблюдается рост расходов в период зимней межени, при этом периоды половодья и летне-осенней межени характеризуются разнонаправленными трендами, поэтому величина трендов коэффициентов зарегулированности различна (см. рис. 2). Полученные результаты в целом, согласуются с данными исследований в других регионах умеренного пояса [1-3] и свидетельствуют о росте подземного питания рек, связанного с увеличением температур холодного периода и сокращением его сроков.

Особый интерес представляют левобережные притоки р. Оби, берущие начало с Большого Васюганского болота и имеющие значительную – около 40% долю заболоченных территорий в общей площади бассейна. У этих рек рост КЕЗ не отмечен (Парабель) или статистически незначим (Васюган) (см. рис. 2). Особенностью их реакции на климатические изменения является рост расходов в апреле и мае. Это может свидетельствовать как о росте объема половодья, связанном с увеличением снегозапасов, так и о смещении сроков снеготаяния на более ранние даты и сдвиге максимума половодья. При этом на р. Васюган рост меженных расходов, в том числе в зимние

месяцы, статистически не значим, в отличие от других рек. Вероятно, на заболоченной части бассейна связь с подземными водоносными горизонтами ослаблена, в связи с этим сток с этих территорий в период межени понижен.

Выводы. На большинстве притоков Верхней Оби за 1960–2020 гг. зафиксирован значимый (в основном на 1 % уровне) рост естественной зарегулированности стока. Это свидетельствует об ослаблении сезонности и увеличении доли базисного стока, что обусловлено преимущественно ростом зимнего меженного стока. При этом отмечается пространственная неоднородность реакции рек на климатические изменения, связанная с физико-географическими условиями их бассейнов и типом водного режима: чем ниже КЕЗ и выше его коэффициент вариации, тем более выражен рост естественной зарегулированности в многолетнем масштабе. Для левобережных притоков, стекающих с Большого Васюганского болота, значимого роста зарегулированности стока не отмечено.

Список литературы

1. Wang H., Liu J., Klaar M., Chen A., Gudmundsson L., Holden J. Anthropogenic climate change has influenced global river flow seasonality // Science. 2024. Vol. 383. No. 6686. pp. 1009-1014.

2. Волчек, А.А., Парфомук С.И., Сидак С.В. Особенности внутригодового распределения стока рек бассейна Припяти // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2020. №.2(120). С. 2-9.

3. Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Нестеренко Д.П., Повалишникова Е.Л. Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. №6. С. 32-49.

4. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ДРЕНАЖНЫХ ВОД ОСУШИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА ВОДОСБОРЕ Р. ЖАБЕНКА

Шаламов Д.И., ***Стрижников О.А.***
ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова», г. Москва
E-mail: d.i.shalamov@yandex.ru

Аннотация: В статье исследуется вопрос оценки качества воды в осушительных каналах. Выполнен анализ возможности использования традиционного индекса загрязнения воды, изначально

созданного для рек и водохранилищ, в условиях осушительных систем. На примере осушительной сети водосбора реки Жабенка рассчитан индекс загрязнения воды по стандартной методике.
Ключевые слова: вода, дренажный сток, поверхностный сток, осушительная сеть, загрязнение.

ASSESSMENT OF POLLUTION OF SURFACE AND DRAINAGE WATERS OF THE DRAINAGE NETWORK IN THE R. ZHABENKA WATER DISTRIBUTION AREA

Shalamov D.I., ***Strizhnikov O.A.***
FSBIS "FSCC VNIIGiM named after A.N. Kostyakov", Moscow
E-mail: d.i.shalamov@yandex.ru

Annotation: The article explores the issue of assessing water quality in drainage channels. It analyzes the possibility of using the traditional water pollution index, which was originally created for rivers and reservoirs, in drainage systems. Using the drainage network of the Zhabenka River catchment area as an example, the water pollution index was calculated using the standard methodology.
Keywords: water, drainage runoff, surface runoff, drainage network, pollution.

Введение

Осушительные каналы выступают критически важным звеном гидромелиоративных комплексов, однако сброс вод из них существенно сказывается на состоянии водоприемников. В связи с этим мониторинг степени загрязнения подобных каналов играет определяющую роль в обеспечении экологической безопасности прилегающих территорий.

Целью исследования является практическая проверка метода для вычисления индекса загрязненности воды (ИЗВ), применяемого к осушительным мелиоративным каналам с учетом особенностей их водного режима и уровня антропогенного давления.

На фоне усиления сельскохозяйственного производства и расширения мелиоративных сетей особое значение приобретает отслеживание химических элементов в поверхностных и дренажных водах, поступающих в водные объекты с сельскохозяйственных водосборов [1]. Формирующийся в ходе работы гидромелиоративных систем дренажный сток отличается повышенным содержанием биогенов, взвесей и прочих элементов, которые создают дополнительную антропогенную нагрузку на водоемы и ведут к ухудшению их экологического состояния. В этой связи систематический мониторинг качества подобных вод является обязательным условием для оценки воздействия аграрной деятельности на водные экосистемы.

Особенно остро обозначенная проблема встает в задачах по рациональному водопользованию, так как характеристики стока с осушительных сетей напрямую влияют на возможность его безопасного отведения, локальной очистки либо вторичного применения [2]. Химический анализ поверхностных и дренажных вод позволяет установить основные тренды формирования их состава, служит основой для разработки

водоохранных мер и способствует повышению эффективности управления водохозяйственными процессами на водосборах.

В этом контексте изучение химического состава поверхностных и дренажных вод, отводимых осушительной системой с водосбора р. Жабенки [3,4], представляет собой востребованную научно-прикладную задачу, нацеленную на получение достоверных данных о качестве водных объектов и на минимизацию негативных последствий сельскохозяйственного стока для водных ресурсов.

Материалы и методы. Исследование проведено на водосборе р. Жабенки, в границах осушительной системы сельскохозяйственного назначения, находящейся на территории РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева. Пробы отбирались в характерных точках водосбора с учётом траекторий как поверхностного, так и дренажного стока, а также для выявления пространственной неоднородности поступления поллютантов (рис. 1). Полевой этап предусматривал применение метода, включающего идентификацию зон загрязнения и забор проб с целью последующего определения ключевых физико-химических параметров воды: pH, содержания растворённого кислорода, биохимического потребления кислорода за 5 суток ($БПК_5$), нитратов и других показателей. Это позволяло оперативно оценивать качественное состояние водной среды в условиях высокой антропогенной нагрузки. Выбор точек отбора и периодичность измерений обосновывалась гидрологическими и агротехническими особенностями территории, что обеспечило получение репрезентативных данных о пространственно-временной изменчивости параметров и заблаговременное выявление участков, наиболее подверженных риску выноса загрязнений в открытые водоёмы.

Лабораторные исследования выполнялись по аттестованным методикам с использованием метрологически поверенных измерительных средств, что гарантировало надёжность и сравнимость полученных результатов. В лабораторных условиях определялись как общепринятые индикаторы качества воды, так и специфические загрязнители, для чего применялись фотоколориметрические и титриметрические методы в строгом соответствии с действующими нормативными документами. Сочетание натурных замеров и детальной аналитической обработки отобранных образцов позволило не только охарактеризовать современное состояние дренажных и поверхностных вод, но и установить основные источники и пути поступления загрязняющих веществ, что служит базой для обоснования природоохранных мероприятий и повышения экологической устойчивости агроэкосистемы водосбора р. Жабенки.

Оценка качества водной среды проводилась с применением интегрального показателя – индекса загрязнения воды, который позволяет обобщить множество частных параметров в единую количественную характеристику. Расчёт ИЗВ выполнялся по стандартной формуле, учитывающей коэффициенты отдельных показателей и их нормированные значения относительно установленных нормативов. В общем виде формула представляла собой сумму нормированных величин по всем анализируемым компонентам, что давало возможность учесть как доминирующие, так и фоновые загрязнения и обеспечивало сопоставимость оценок для различных проб в пространстве и во времени.

Использование ИЗВ позволяло объективно ранжировать пробы по степени загрязнённости и служило основой для выделения наиболее проблемных участков, а также для разработки последующих мер по снижению негативного воздействия дренажных стоков на водоприёмники.

Индекс загрязнения воды рассчитывается по формуле 1:

$$ИЗВ = \frac{\Sigma(C_{1-6} / ПДК_{1-6})}{6} \quad (1)$$

где n — число показателей, используемых для расчёта (для поверхностных вод суши n = 6); C_i — концентрация i-го загрязняющего вещества в воде; $ПДК_i$ — предельно допустимая концентрация i-го загрязняющего вещества.

Результаты и обсуждения. Выполненные исследования свидетельствуют, что на водосборе р. Жабенки формируется дренажный сток, качественные характеристики которого в значительной степени зависят от режима увлажнения территории и интенсивности сельскохозяйственной нагрузки. Полученные данные обрабатывали с помощью статистических методов, после чего сравнивали значения показателей по разным точкам отбора и оценивали их соответствие санитарно-экологическим нормативам. Такой подход обеспечивал комплексную характеристику химического состава поверхностных и дренажных вод и позволял выявить особенности формирования их качества в пределах исследуемого водосбора.

Полевые работы на водосборе р. Жабенки начинались с подробного визуального осмотра осушительной сети и примыкающих сельскохозяйственных угодий. Этот этап был необходим для предварительной оценки условий образования дренажного стока, поскольку именно пространственная неоднородность увлажнения, состояние открытых каналов и характер водоотведения определяют, какие участки служат основными источниками поступления загрязнённых вод в водоприёмник. Визуальное обследование дало возможность установить места застоя воды, локального переувлажнения почв,

признаки поверхностного стока с полей, а также зон с наиболее выраженным антропогенным воздействием на водную среду. Тем самым был обеспечен переход от общего анализа территории к выбору конкретных точек отбора, репрезентативных для последующей оценки качества воды.

Особое внимание уделяли элементам осушительной сети, непосредственно принимающим поверхностный и дренажный сток, каналу-водоприёмнику и участкам магистральных каналов, где наблюдаются наиболее заметные изменения водного режима территории. Такой подход имел принципиальное значение, поскольку в условиях открытой дренажной сети распределение стока зависит не только от рельефа, но и от неоднородности территории, расположения понижений и направленности поверхностного водоотведения. Таким образом, визуальное обследование служило основой для выбора репрезентативных точек отбора и последующей интерпретации результатов анализа.

Отбор проб проводили непосредственно из элементов осушительной сети [5,6]. При отборе проб соблюдали принцип репрезентативности. Образцы отбирали в точках, отражающих типичные условия движения стока, а не случайные локальные аномалии [7,8] (рис. 1). Такой подход снижает риск недостоверности результатов, связанный с неоднородностью потока, и позволяет в дальнейшем корректно интерпретировать данные гидрохимического анализа.

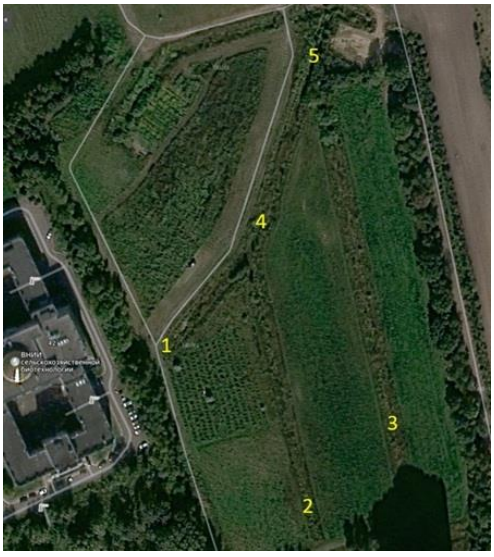


Рис. 1 – Точки отбора проб воды с осушительной сети

По результатам исследований исходные дренажные воды отличались высокой концентрацией растворённых веществ, в первую очередь железа, органических загрязнителей и биогенных элементов.

Лабораторный анализ отобранных проб показал, что исходный дренажный сток характеризуется повышенным содержанием взвешенных веществ и биогенных компонентов, что указывает на поверхностный сток и перенос веществ с сельскохозяйственных территорий. Величина интегрального показателя ИЗВ в исходном стоке на большинстве пунктов отбора находилась в пределах от 2,5 до 3,7, что по принятой шкале соответствует IV классу качества и позволяет отнести эти пробы к категории загрязнённых водных объектов. Такое распределение ИЗВ коррелировало с пространственным положением точек отбора и интенсивностью сельскохозяйственной нагрузки. Самые высокие значения фиксировались вблизи полей с активным внесением удобрений и на участках, где действуют дополнительные дренажные системы (табл. 1).

Таблица 1 – Определение индекса загрязнения воды в сети осушительных каналов на водосборе р. Жабенка

Точка/Показатель	1	2	3	4	5	$ПДК_{р-х}$
pH	6,3	5,9	5,8	4,0	5,5	6,5 - 8,5
$БПК_5$, мг/л	21	18	17	14	14	<2,1
O_2, мг/л	6,43	5,49	6,25	6,30	5,40	>6,0
Нитрат-ион (NO_3^-), мг/л	21,32	17,34	19,87	24,35	34,58	<40
Хлориды (Cl^-), мг/л	11,53	9,69	8,65	15,70	7,80	<300
Железо общее» (Fe (II) и Fe (III), мг/л	0,1	0,7	0,4	1,1	0,7	<0,1
Аммоний-ион (NH_4^+), мг/л	0,0	2,0	0,5	0,7	0,5	<0,5
ИЗВ	2,1 – умеренно загрязненная вода	3,5 – загрязненная вода	2,4 – умеренно загрязненная вода	3,5 – загрязненная вода	2,7 – загрязненная вода	-

В связи с этим результаты работы свидетельствуют о необходимости предварительной оценки и последующей очистки дренажных вод перед их сбросом в природные водные объекты, даже при относительно малых расходах стока [9,10].

Заключение. Сравнительный анализ полученных данных свидетельствует о формировании дренажных вод под воздействием интенсивного антропогенного фактора, при этом их качественные характеристики не могут быть признаны устойчивыми в отсутствие природоохранных мер [9]. В связи с этим регулярный мониторинг химического состава водных объектов в бассейне реки Жабенки необходимым для оценки экологического состояния и разработки научно обоснованного плана природоохранных мероприятий, направленных на уменьшение уровня загрязнения водоприемников.

Список литературы

1. Трансформация малой реки как результат воздействия сельскохозяйственной деятельности / А. П. Пакусина, Т. П. Платонова, А. А. Сасин, С. А. Фокин // Естественные и технические науки. – 2024. – № 4(191). – С. 85-92.

2. Евграфов, А. В. Оценка состояния водных экосистем в зоне влияния четырех закрытых полигонов ТКО / А. В. Евграфов, Н. С. Косов, Н. В. Лагутина // Тимирязевский биологический журнал. – 2024. – № 2. – С. 16-29.

3. Беглярова Э.С. Изменение показателей загрязнения поверхностного стока городских территорий при проведении строительных работ например частных водосборов рек Лихоборки и Жабенки / Э.С. Беглярова, С.А. Соколова, А.М. Бакштанин // Гидротехническое строительство. 2020. № 11. С. 48-52.

4. Дубенок, Н. Н. Гидрологическая характеристика территории Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева / Н. Н. Дубенок, А. В. Лебедев, А. В. Гемонов // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 2. – С. 5-17.

5. Angold, Y. V. Water-saving technologies and irrigation facilities / Y. V. Angold, V. A. Zharkov, A. A. Kalashnikov // Water Practice and Technology. – 2015. Т. 10. № 3. С. 556-563.

6. Angold, E. V. Features of the Drip-sprinkling Irrigation Technology / E. V. Angold, V. A. Zharkov // Young and senior water professionals conference : Proceedings of the IWA 5th Eastern European Young and Senior Water Professionals Conference, Kyiv, 26–28 июня 2013 года. Vol. Part 1. – Kyiv: IWA Publishing, 2013. – P. 23-27.

7. Малые реки Саратовской области как объект водопользования: мониторинг экологического состояния, комплексная оценка и повышение качества воды / Н. В. Веденеева, А. А. Беляченко, С. А. Киященко, Е. И. Тихомирова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 2-3. – С. 642-646.

8. Экологическое нормирование в природопользовании: Практикум / А. В. Евграфов, И. И. Васенев, Т. М. Джанчаров [и др.]. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2023. – 91 с.

9. Черных, О. Н. Пути решения проблем комплексной экологической реабилитации и природоприближённого восстановления малых рек русских усадеб москвы / О. Н. Черных, Н. В. Ханов, А. В. Бурлаченко // Природообустройство. – 2019. – № 1. – С. 47-55.

10. Кирейчева, Л. В. Обоснование комплекса мероприятий, направленных на снижение диффузного загрязнения в бассейнах малых рек / Л. В. Кирейчева, Е. В. Ангольд, Ю. С. Кузнецов // Мелиорация и гидротехника. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 149-173.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЛУГОВЫХ ЛИМАНОВ СЕВЕРНОГО ПРИКАСПИЯ

Зинченко Е.В., Мамин В.Ф.
Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал ФГБНУ Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, г. Волгоград
e-mail: kshnkaterina@yandex.ru

Аннотация: В статье рассматривается экологическая устойчивость луговых лиманов Северного Прикаспия как уникальных природных комплексов аридной зоны. Особое внимание уделяется влиянию водного режима и климатических изменений на состояние растительных сообществ. Анализируется роль луговых лиманов в сохранении биоразнообразия, поддержании кормовой продуктивности и устойчивом функционировании пастбищных угодий. Выделяются основные факторы антропогенной нагрузки, включая чрезмерный выпас скота, сенокошение и нарушение естественного режима обводнения. Обосновывается необходимость экологического мониторинга, рационального природопользования и комплексных мероприятий по сохранению и восстановлению лиманных экосистем.

Ключевые слова: луговые лиманы, экологическая устойчивость, Северный Прикаспий, водный режим, пастбищные угодья, биоразнообразие, растительные сообщества.

ECOLOGICAL SUSTAINABILITY OF MEADOW LIMANS IN THE NORTHERN CASPIAN REGION

Zinchenko E.V., *Mamin V.F.*
All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, a branch of the A.N. Kostyakov Federal Scientific Centre for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Volgograd
e-mail: kshnkaterina@yandex.ru

Abstract: The article examines the ecological sustainability of meadow limans in the Northern Caspian Region as unique natural complexes of the arid zone. Particular attention is paid to the effects of the water regime and climate change on the condition of plant communities. The role of meadow limans in biodiversity conservation, the maintenance of forage productivity, and the sustainable functioning of pasturelands is analysed. The main factors of anthropogenic pressure are identified, including overgrazing, haymaking, and disruption of the natural flooding regime. The need for environmental monitoring, sustainable natural resource management, and comprehensive measures aimed at conserving and restoring liman ecosystems is substantiated.

Keywords: meadow limans, ecological sustainability, Northern Caspian Region, water regime, pasturelands, biodiversity, plant communities.

Введение. Луговые лиманы Северного Прикаспия занимают значительные площади в пределах Прикаспийской низменности (площадь лиманов оценивается в 1,5–2 млн га). Эти экосистемы расположены в полупустынной зоне Астраханской, Волгоградской областей и Западного Казахстана и являются важным структурно-функциональным компонентом аридных ландшафтов [1, 2]. Их экологическое и хозяйственное значение обусловлено выполнением основных функций:

1. Сохранение биологического разнообразия. Лиманные экосистемы служат местообитаниями многочисленных видов растений и животных, в том числе редких и имеющих природоохранную ценность.

2. Регулирование гидрологического режима. Аккумуляция талых и паводковых вод способствует пополнению запасов грунтовых вод, поддержанию локального водного баланса и смягчению последствий засушливых периодов.

3. Обеспечение кормовой базы животноводства. Луговые лиманы используются как высокопродуктивные сенокосные и пастбищные угодья, обеспечивающие получение качественного сена и зелёного корма.

Вместе с тем в условиях аридного климата, дефицита влаги и усиления антропогенной нагрузки наблюдается устойчивая тенденция к деградации луговых лиманов [3, 4]. Это выражается в снижении их продуктивности, обеднении флористического состава, засолении почв и локальном опустынивании. Поэтому исследование закономерностей функционирования данных экосистем и разработка мер по их сохранению является насущной научной и практической задачей.

Основным фактором, определяющим экологическую устойчивость лиманных экосистем, а также нормальное функционирование их фитоценоз, является водный режим и характер его многолетней динамики. Устойчивость луговых лиманов определяется комплексом взаимосвязанных факторов, которые можно разделить на природные и антропогенные.

Природные факторы:

- колебания климата, в том числе периодические засухи и затяжные маловодные периоды на реках;

- изменение гидрологического режима – снижение уровня паводковых вод из-за естественных причин;

- вторичное засоление почв вследствие высокой минерализации грунтовых вод.

Антропогенные факторы:

- нерегулируемый выпас скота, приводящий к изреживанию травостоя, уплотнению почвы и разрушению дернины;

- гидротехнические мероприятия – строительство дамб, каналов и водохранилищ, нарушающих естественный паводковый сток;

- распашка прилегающих к лиманам земель и использование тяжёлой сельскохозяйственной техники, приводящие к деградации почвенного покрова.

Сочетание природных и антропогенных факторов часто усиливает негативные последствия, вызывая необратимые изменения экосистем.

Нарушение устойчивости луговых лиманов развивается по нескольким механизмам, часто действующим одновременно.

Пастбищная дигрессия – при чрезмерном выпасе происходит изреживание травостоя, выпадение ценных кормовых злаков и замена их на плохо поедаемые и сорные растения (полынь, молочай, осот). На более поздних стадиях образуются сбои – участки с полностью уничтоженной растительностью и уплотненной почвой.

Смена флористического состава – при нарушении водного режима вместо луговых мезофильных видов распространяются ксерофильные и галофильные растения: кермек, солянки, полынь черная. Это свидетельствует о трансформации лугового фитоценоза в сторону опустынивания.

Засоление почв – при недостаточном промывании почвы грунтовыми водами происходит накопление солей в верхних горизонтах, что угнетает растительность и снижает продуктивность.

В совокупности эти процессы приводят к необратимой деградации лиманов и потере их экологических функций [5, 6].

Цель и задачи исследований. Целью наших исследований является оценка современного состояние и факторов влияющих на экологическую устойчивость пастбищных угодий Северного Прикаспия, а также разработка научно обоснованных рекомендации по их сохранению и рациональному использованию в условиях антропогенной нагрузки и аридизации климата.

Для выполнения указанной цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать природно-климатические, гидрологические и почвенно-мелиоративные условия формирования лиманов Северного Прикаспия как основы их экологической устойчивости.

- классифицировать лиманы региона по типам водного питания, степени антропогенной трансформации и уровню экологического состояния.

- выявить и количественно оценить основные природные и антропогенные факторы (климатические изменения, зарегулирование стока, перевыпас, распашка земель, сброс дренажных вод и др.), влияющие на устойчивость лиманных экосистем.

- разработать систему индикаторов и критериев оценки экологической устойчивости лиманов (включая показатели биоразнообразия, продуктивности, водного баланса, деградации почв).

- разработать рекомендации по оптимизации природопользования и мелиоративных режимов, направленные на повышение или поддержание экологической устойчивости лиманов Северного Прикаспия.

Материалы и методы. Объектами исследования являются лиманные экосистемы различные по гидрологическому режиму, степени засоления почв, характеру растительного покрова и уровню антропогенной нагрузки.

Оценку состояния луговых лиманов проводили по следующим критериям:

Продуктивность фитоценозов – величина надземной фитомассы, урожайность сена, доля ценных кормовых видов в травостое.

Флористическое разнообразие – видовой состав, присутствие редких и индикаторных видов, соотношение хозяйственных групп растений (злаки, бобовые, разнотравье, сорные виды).

Почвенное плодородие – содержание гумуса, подвижных форм азота, фосфора и калия, степень засоления и солонцеватости.

Способность к самовосстановлению – семенная продуктивность, появление всходов, скорость зарастания нарушенных участков.

Гидрологический режим – площадь и продолжительность затопления, глубина затопления, уровень залегания грунтовых вод и их минерализация.

Динамика этих показателей позволяет судить о том, находится ли экосистема в состоянии устойчивого равновесия или происходит ее деградация [7].

Полевые исследования включали маршрутные обследования, геоботанические описания и оценку состояния почвенного и растительного покрова. Гидрологическое состояние лиманов оценивали по площади и продолжительности затопления, глубине промачивания, уровню залегания грунтовых вод и степени увлажнения почв [8, 9].

Результаты и обсуждение. Многолетние исследования лиманных экосистем Северного Прикаспия учеными Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия позволили выявить устойчивые тренды их трансформации, а также установить основные механизмы деградационных процессов. Установлено, что главной причиной деструкции биоценозов является глубокое нарушение естественной ритмики гидрологического режима лиманов, происходящее на фоне резкой смены водного режима и низкой культуры водопользования на ирригационно-освоенных лиманах. Вследствие этого современное состояние лиманов характеризуется как регрессивное: наблюдается разрушение фитоценотических структур, снижение продуктивности луговых сообществ и упадок лиманного кормопроизводства.

С середины 1990-х годов режим эксплуатации лиманов резко изменился: около 50% ирригационно освоенных площадей не затапливается, удобрения не вносятся, а пастбищная нагрузка возросла из-за сокращения посевов кормовых культур на регулярно орошаемых землях. На остальных лиманах без азотных подкормок при сенокосно-

пастбищном использовании не создаются условия, обеспечивающие обратимость процесса гигрофитизации, что ведёт к глубоким сукцессионным изменениям и замене ценных мятликовых сообществ на малоценные осоково-разнотравные.

Прекращение поливов вызывает не менее тяжелые экологические последствия. Это обусловлено затрудненной реадаптацией гигромезофильных и мезофильных травяных сообществ к длительно формировавшимся ксероморфным условиям. Растения, в течение 20–30 лет адаптированные к бездефицитному водному режиму, в условиях постоянного водного стресса постепенно теряют жизнеспособность и элиминируются из состава фитоценоза. Освободившиеся экологические ниши могут быть заселены ксерофитными видами семейства мятликовых, такими как житняки, типчак, тонконог и острец, однако этот процесс занимает 8 и более лет и возможен лишь при определенном соответствии условий экотопа их экологическим требованиям. Следовательно, прекращение поливов также создает угрозу временного опустынивания территории бывшего лимана.

Лиманы всех типов деградируют при сокращении водной нагрузки. На лиманах выпотного типа, где в постмелиоративный период гомеостаз поддерживался за счет систематических промывок почвогрунтов и формирования «подушки» пресных ирригационно-грунтовых вод, прекращение поливов привело к развитию вторичного засоления и повторной галофитизации растительного покрова. Периферийные ярусы таких лиманов постепенно трансформируются в мокрые и пухлые солончаки.

На долгопоемных лиманах непромывного типа, сформированных на мощных пластах хвалынских шоколадных глин, гигрофильные виды переходят в глубокий покой или элиминируются, при этом их замещение мезофитами и ксерофитами из семейства мятликовых не происходит. Хозяйственно ценный травостой не формируется. На среднепоемных ярусах ещё сохраняют жизненность популяции пырея ползучего и бекмании обыкновенной, однако покосопригодных травостоев они не образуют.

На средне- и краткопоемных лугах лиманов промывного типа наиболее выражена ксерофитизация: эдификаторные виды элиминируют (такие как лисохвост, кострец, пырей, бекмания), молодые особи не достигают генеративной стадии, травостой изреживается и представлен сенильными растениями. Усиливается мозаичность сообществ за счёт внедрения костра кровельного, полыни австрийской, льнянки Биберштейна, мортука пшеничного, вьюнка полевого. Эти изменения квалифицируются как ретрогрессивная сукцессия (аллогенный гейтогенез). На лёгких почвах луга разрушаются особенно сильно, а пастбищная перегрузка приводит к полному сбою

растительного покрова с развитием эрозионных процессов и последующим опустыниванием их площади.

Ирригационно неосвоенные лиманы, ещё в 1950–60-х годах лишившиеся аккумуляции талых вод, находятся на грани исчезновения. Используемые как всесезонные пастбища, они сильно сбиты скотом: в мае запас сухой поедаемой массы здесь составляет 0,1–0,2 т/га, что ниже показателей плакоров с полынно-ромашниковыми ассоциациями (0,3–0,4 т/га). В составе травостоев доминируют малопродуктивные коренные и адвентивные виды, истощение популяций ценных трав показывает, что даже при возобновлении поливов без агромелиоративных мероприятий урожайность таких лиманов не превысит 25% прежнего уровня.

Исследованиями установлено, что деструктивные и восстановительные эдафогенные сукцессии фитоценозов характеризуются неодинаковой интенсивностью. Дигрессия злаковых сообществ, как правило, протекает в 2–3 раза быстрее, чем процессы их демутации. Это свидетельствует о том, что деградация формаций наиболее ценных в кормовом и средообразующем отношении лиманных трав приводит к долговременной утрате их экологической и хозяйственной значимости.

Социально-экономическое значение лиманов не ограничивается их использованием в качестве кормовых угодий. В Северном Прикаспии как естественные, так и искусственно созданные лиманы исторически играли важную роль в формировании гидрогеологических условий, обеспечивая пополнение запасов и опреснение грунтовых вод. Расположенные по периферии лиманов колодцы на протяжении длительного времени служили источниками водоснабжения населения и сельскохозяйственных животных. Осушение лиманов, сопровождающееся деградацией луговых фитоценозов и повышением минерализации колодезных вод, приводит к необходимости перемещения животноводческих объектов и может обусловливать локальную миграцию населения.

В настоящее время процессы деструкции лиманных экосистем практически не контролируются. Деградация лиманов, выведенных из хозяйственного оборота, сопровождается утратой их гидрологических и фитоценотических функций, имеющих важное средообразующее значение для ландшафтов равнинного Прикаспия. Дальнейшее исчезновение этих экосистем может привести к следующим негативным последствиям:

• снижению ландшафтного и биологического разнообразия полупустынных районов региона;

• утрате многими хозяйствами возможности заготавливать сено на стойловый период и использовать лиманные угодья для выпаса скота в наиболее напряжённый позднелетний период;

• исчезновению резерватов ценных кормовых трав, представляющих собой исходный материал для селекции высокоадаптированных сортов луговых растений и их последующего использования при проведении фитомелиоративных мероприятий;

• обеднению региональной флоры (некоторые виды растений, произрастающие на лиманах, уже включены в Красную книгу как редкие и находящиеся под угрозой исчезновения);

• существенному изменению гидрогеологических условий, проявляющемуся прежде всего в снижении уровня и повышении минерализации грунтовых вод, а также в исчезновении линз пресных ирригационно-грунтовых вод в отложениях ательского яруса. Эти процессы могут привести к нарушению естественного водоснабжения обширных территорий и ухудшению условий жизни местного населения.

Для сохранения и восстановления луговых лиманов Северного Прикаспия необходим комплексный подход, включающий разработанные в нашем институте организационные и технические мероприятия.

Регулирование гидрологического режима. Необходимо обеспечить оптимальное обводнение лиманов за счет перераспределения паводкового стока, создания водорегулирующих сооружений (шлюзов, дамб с пропусками). Это позволит поддерживать оптимальный водный баланс.

Рациональное использование пастбищ. Внедрение пастбищеоборотов с чередованием выпаса и отдыха, расчет допустимой нагрузки скота с учетом продуктивности конкретного лимана. Ограничение выпаса во влажные периоды для предотвращения уплотнения почвы.

Нормирование сенокошения. Соблюдение оптимальных сроков скашивания (после обсеменения ценных трав), а также оставление участков для естественного восстановления.

Фитомелиорация. Подсев ценных кормовых трав (пырей, кострец, люцерна, донник) на деградированных участках. Использование солеустойчивых видов для восстановления засоленных земель.

Охрана почв. Применение научно обоснованной агротехники, запрет распашки лиманных земель, борьба с ветровой эрозией путем создания лесополос и кустарниковых кулис.

Мониторинг и научное сопровождение. Создание системы постоянного наблюдения за состоянием лиманов: контроль продуктивности, ботанического состава, уровня грунтовых вод, засоленности. Использование ГИС-технологий для прогнозирования изменений и своевременного принятия решений.

Заключение. В ближайшей перспективе необходима инвентаризация лиманов с определением их продуктивного бонитета, степени деградации и реалий восстановления. Должен осуществляться государственный экологический надзор за их использованием, введён запрет на эксплуатацию без проведения ресурсовосполняющих мероприятий, некоторые лиманы целесообразно временно перевести на рекреационный режим, исключающий пастьбу животных. Необходима разработка правового и социально-экономического механизма действий по сохранению лиманов, в том числе финансовой и правовой ответственности за их деградацию.

Для участков с наиболее выраженной деградацией растительного покрова целесообразно введение временного восстановительного режима, предусматривающего полное исключение выпаса сельскохозяйственных животных и иных форм интенсивного антропогенного воздействия. Одновременно требуется разработка комплекса правовых и социально-экономических мер, направленных на сохранение лиманных экосистем, включая механизмы стимулирования рационального природопользования, а также закрепление юридической и финансовой ответственности за их деградацию.

Только внедрение адаптивных систем управления, основанных на регулярном мониторинге и научно обоснованных нормах нагрузки, позволит сохранить эти экосистемы для будущих поколений.

Список литературы

1. Тютюма, Н. В. Технологические приемы рекультивации деградированных аридных пастбищных экосистем в Северном Прикаспии // Степи Северной Евразии: Материалы X международного симпозиума (Международного степного форума), Оренбург, 27 мая – 02 2024 года. – Оренбург: Институт степи УрО РАН Оренбургского федерального исследовательского центра УрО РАН. 2024. – С. 1369-1375.

2. Зволинский В.П., Туманян А.Ф. Пастбищные ландшафты левобережья Нижней Волги. Монография. Волгоград: ВГОУ ВПО Волгоградская ГСХА, 2011. - 320 с

3. Кульжанова С.Н., Байдюсен А.А., Ботабекова Б.Т., Жумадилова Н.Б. Особенности влияния антропогенных факторов на степные растения и их трансформация // Кормопроизводство. - 2017. - № 7. - С. 7-12.

4. Пугачёва А.М., Беляев А.И., Трубакова К.Ю., Ромадина О.Д. Региональные изменения климата в сухих степях и их связь с засухами // Аридные экосистемы. 2022. - Т. 28. - № 3 (92). - С. 13-21.

5. Шагаипов М.М., Булахтина Г.К. Влияние заповедного режима использования естественных пастбищ на продуктивность опустыненной степи Северного Прикаспия // Теоретические и прикладные проблемы АПК, 2013. - № 2 (15). - С. 59-61.

6. Дедова Э.Б., Гольдварг Б.А., Цаган-Манджиев Н.Л. Деградация земель Республики Калмыкия: проблемы и пути их восстановления // Аридные экосистемы, 2020. - Т. 26. - № 2 (83). - С. 63-71.

7. Мамин, В. Ф. Экологические проблемы использования лиманных лугов на современном этапе. Волгоград: Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия, 2022. – 196 с.

8. Василевич В.И. Статистические методы в геоботанике. Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1969. - 232 с.

9. Раменский Л.Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1971. -334 с.

РОЛЬ ПОЛЕЗНОЙ ЭНТОМОФАУНЫ В УСТОЙЧИВОСТИ АГРОЦЕНОЗОВ ЛУКА И ЧЕСНОКА УЗБЕКИСТАНА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Акромов Б.А.
Научно-исследовательский институт карантина и защиты растений, г. Ташкент.
E-mail: b.akromov@mail.ru

Аннотация. Изменение климата оказывает существенное влияние на агроэкосистемы, делая сохранение биоразнообразия полезных организмов критически важным для естественного регулирования численности фитофагов. В статье приведены результаты исследования по изучению видового состава полезной энтомофауны агроценозов лука репчатого (Allium cepa L.) и чеснока (Allium sativum L.) и оценка роли энтомофагов и акарифагов в условиях меняющегося климата Узбекистана. Полевые исследования проводились на производственных посевах в различных природно-климатических зонах республики с использованием маршрутных обследований, энтомологических сачков, почвенных ловушек, ручного сбора и лабораторного выращивания паразитоидов. В результате зарегистрировано 90 видов энтомофагов и акарифагов, относящихся к 9 отрядам и 21 семейству. Доминирует класс Insecta, представленный 85 видами (94,4 %), тогда как класс Arachnida включает 5 видов (5,6 %).

Ключевые слова: лук репчатый, чеснок, изменение климата, глобальное потепление, энтомофаги, акарифаги, интегрированная защита растений, биоразнообразие, агроценоз, Узбекистан.

THE ROLE OF BENEFICIAL ENTOMOFAUNA IN THE STABILITY OF AGRICULTURAL CROPS OF ONIONS AND GARLIC IN UZBEKISTAN UNDER CONDITIONS OF GLOBAL WARMING

Akromov B.A.
Research Institute of Quarantine and Plant Protection, Tashkent
e-mail: b.akromov@mail.ru

Annotation. Climate change has a significant impact on agroecosystems, making the preservation of biodiversity of beneficial organisms critically important for the natural regulation of phytophage populations. The article presents the results of a study examining the species composition of beneficial entomofauna in the agrocenoses of onion (Allium cepa L.) and garlic (Allium sativum L.) and assessing the role of entomophages and acariphages in the context of Uzbekistan's changing climate. Field studies were conducted on commercial crops in various natural and climatic zones of the republic, using route surveys, entomological nets, soil traps, manual collection, and laboratory cultivation of parasitoids. As a result, 90 species of entomophagous and acariphagous insects were recorded, belonging to 9 orders and 21 families. The Insecta class dominates, represented by 85 species (94.4 %), while the Arachnida class includes 5 species (5.6 %).

Keywords: onions, garlic, climate change, global warming, entomophages, acariphages, integrated plant protection, biodiversity, agrocenosis, Uzbekistan.

Введение

Овощеводство традиционно является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей сельского хозяйства Республики Узбекистан. Лук репчатый и чеснок занимают ведущие позиции среди овощных культур благодаря высокой пищевой ценности, хорошей транспортабельности и устойчивому спросу на внутреннем и внешнем рынках. Однако получение стабильных урожаев в последние годы осложняется изменением климатических условий, сопровождающимся повышением среднегодовой температуры воздуха, увеличением количества экстремально жарких дней, изменением режима осадков и усилением дефицита оросительной воды [1, 7].

По оценкам международных организаций, изменение климата становится одним из основных факторов трансформации фитосанитарного состояния агроэкосистем. Повышение температуры способствует ускорению развития насекомых, увеличению числа поколений за сезон, расширению ареалов теплолюбивых видов и нарушению экологического равновесия между вредителями и их естественными врагами. В результате возрастает риск вспышек массового размножения фитофагов и увеличивается зависимость сельскохозяйственного производства от химических средств защиты растений.

Агроценозы лука и чеснока отличаются высоким видовым разнообразием фитофагов. Наиболее опасными являются луковый трипс (Thrips tabaci Lindeman), луковая муха (Delia antiqua Meigen), минирующие мухи рода Liriomyza, различные виды тлей, совок, клещей и других вредителей. В условиях повышения температуры и увеличения продолжительности вегетационного периода многие из этих видов способны раньше заселять посевы, быстрее развиваться и формировать дополнительные поколения, что повышает их экономическую вредоносность [1, 6, 8].

Одновременно с этим возрастает роль естественных регуляторов численности вредителей — энтомофагов и акарифагов. Хищные жуки, пауки, златоглазки, журчалки, паразитические перепончатокрылые, хищные клопы и другие представители полезной энтомофауны способны существенно снижать численность фитофагов без применения инсектицидов. Их сохранение рассматривается как один из ключевых элементов современных систем интегрированной защиты растений, направленных на повышение экологической устойчивости агроэкосистем и снижение пестицидной нагрузки [3, 4].

В связи с этим изучение видового разнообразия полезной энтомофауны, ее трофических связей с вредителями и роли в поддержании фитосанитарного равновесия

приобретает особую актуальность в условиях продолжающегося глобального потепления. Полученные сведения могут служить научной основой для совершенствования биологических и интегрированных методов защиты лука и чеснока в Узбекистане.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились в 2021–2025 гг. на производственных и опытных посевах лука репчатого (Allium cepa L.) и чеснока (Allium sativum L.), расположенных в различных почвенно-климатических зонах Республики Узбекистан. Обследования выполняли в течение всего вегетационного периода на стационарных участках, где инсектицидные обработки не проводились, что позволило объективно оценить формирование и функционирование естественных популяций полезной энтомофауны.

Учеты энтомофагов проводили каждые 10 суток маршрутным методом. Для сбора насекомых использовали энтомологический сачок (100 взмахов в 10 повторностях по диагонали поля), визуальные обследования растений, ручной сбор, а также почвенные ловушки [2]. Для изучения почвенной полезной энтомофауны применяли стеклянные ловушки объемом 0,5 л, установленные заподлицо с поверхностью почвы [5]. На каждом опытном участке размещали по 10 ловушек, учет которых проводили через каждые пять суток.

Для выявления паразитоидов яйца, личинки и куколки вредителей отбирали в природных условиях и содержали в лаборатории до выхода взрослых особей паразитов. Полученный материал фиксировали в 70 %-ном этиловом спирте с добавлением 1 % глицерина. Видовую принадлежность энтомофагов определяли с использованием специализированных определителей и современных таксономических источников [2].

При анализе результатов особое внимание уделяли трофическим связям между энтомофагами и основными вредителями лука и чеснока, а также возможному влиянию климатических факторов на формирование структуры полезной энтомофауны.

Результаты исследований и обсуждение

Проведенные исследования показали, что агроценозы лука и чеснока Узбекистана характеризуются высоким разнообразием полезной энтомофауны. Всего зарегистрировано 90 видов энтомофагов и акарифагов, относящихся к 2 классам, 9 отрядам и 21 семейству. Подобное разнообразие свидетельствует о высокой экологической устойчивости агроценозов при условии сохранения естественных местообитаний и рационального применения средств защиты растений.

Наиболее многочисленным оказался класс Insecta, включающий 85 видов (94,4 %), тогда как представители класса Arachnida были представлены 5 видами (5,6 %).

Доминирующее положение среди насекомых занимали представители отряда Coleoptera, включавшие 41 вид, или 45,5 % всей полезной энтомофауны. Значительную часть этой группы составляли жужелицы (Carabidae), играющие важную роль в уничтожении почвообитающих стадий вредителей, а также божьи коровки (Coccinellidae), являющиеся эффективными хищниками тлей и других мелких фитофагов.

По типу питания выявленная полезная энтомофауна подразделялась на три экологические группы. Наибольшую долю составляли хищные виды — 82,2 %. Паразитоиды были представлены 16,7 % видов, тогда как лишь один вид (Aleochara bilineata Gyll.) сочетал паразитический и хищный образ жизни.

Анализ трофических связей показал, что большинство энтомофагов характеризуются широкой пищевой специализацией. Более 70 % выявленных видов способны уничтожать представителей чешуекрылых, около половины питаются двукрылыми и тлями, а треть видов регулирует численность клещей и трипсов. Такое разнообразие пищевых связей обеспечивает устойчивость природной системы биологического контроля даже при изменении структуры комплекса вредителей.

В последние десятилетия изменение климата оказывает все более заметное влияние на взаимодействие между вредителями и их естественными врагами. Для территории Узбекистана характерны увеличение продолжительности периода с температурами выше +30 °C, сокращение холодного сезона и учащение продолжительных засух. Эти изменения способствуют более раннему выходу из диапаузы многих фитофагов, сокращению продолжительности их развития и увеличению количества поколений за один вегетационный сезон.

Особенно заметно это проявляется у табачного трипса (Thrips tabaci), различных видов тлей и минирующих мух, численность которых в жаркие годы возрастает значительно быстрее, чем в годы с более умеренными температурами. Одновременно высокая температура способна изменять сроки появления отдельных энтомофагов, что приводит к временному нарушению синхронности между хищником или паразитоидом и его жертвой.

Несмотря на это, исследования показали, что богатое видовое разнообразие полезной энтомофауны способствует сохранению естественного биологического равновесия. Наличие нескольких экологически близких групп энтомофагов позволяет компенсировать снижение активности отдельных видов в экстремальных погодных условиях. Наиболее устойчивыми к высоким температурам оказались представители семейств Carabidae, Coccinellidae, Chrysopidae и ряд пауков, сохранявшие высокую активность даже в наиболее жаркие периоды вегетации.

Полученные результаты подтверждают, что в условиях глобального потепления значение естественных энтомофагов возрастает. Их сохранение позволяет уменьшить частоту применения инсектицидов, снизить риск возникновения резистентности у вредителей, сохранить опылителей и повысить экологическую устойчивость агроценозов лука и чеснока [1, 4]. Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают, что богатое видовое разнообразие полезной энтомофауны является важнейшим фактором устойчивости агроценозов лука и чеснока. В условиях продолжающегося изменения климата роль естественных энтомофагов будет возрастать, а их сохранение должно рассматриваться как один из основных элементов адаптации овощеводства Узбекистана к современным климатическим вызовам.

Выводы

В агроценозах лука репчатого и чеснока Узбекистана выявлено 90 видов энтомофагов и акарифагов, относящихся к 2 классам, 9 отрядам и 21 семейству, что свидетельствует о высоком биоразнообразии естественных врагов вредителей. Основную часть полезной энтомофауны составляют представители класса Insecta — 85 видов (94,4 %), тогда как представители класса Arachnida включают 5 видов (5,6 %). По характеру питания доминируют хищные виды (82,2 %), паразитоиды составляют 16,7 %, а смешанный тип развития отмечен лишь у одного вида.

Наибольшее значение в естественном регулировании численности вредителей имеют представители семейств Carabidae, Coccinellidae, Chrysopidae, Syrphidae, Anthocoridae, а также пауки и паразитические перепончатокрылые.

В условиях изменения климата ожидается увеличение значения полезной энтомофауны вследствие возможного роста численности теплолюбивых фитофагов и изменения сроков их развития. Это повышает роль биологического контроля как одного из основных элементов устойчивых агроэкосистем. Следует отметить, что данный вывод основан на современных литературных данных об изменении климата и интерпретируется применительно к агроценозам Узбекистана; для количественной оценки необходимы длительные многолетние наблюдения.

Сохранение полезной энтомофауны должно рассматриваться как важнейший элемент интегрированной защиты растений, обеспечивающий снижение применения инсектицидов, уменьшение риска формирования резистентности у вредителей и повышение экологической устойчивости производства овощной продукции.

Список литературы

1. Акромов Б.А. Энтомофауна на агробиоценозе лука и чеснока в Узбекистане / Сборник статей XXX международной научно-практической конференции «Advances in Science and Technology» (Москва, 31 июля 2020г.). – Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2020. – С. 7-8.

2. Бей-Биенко Г. Я. Общая энтомология. М.: Высшая школа, 1980. 376 с.

3. Камбарова М. Х., Носирова З. Г. Использование энтомофагов в борьбе с вредителями в условиях Узбекистана // Биология ва тиббиёт муаммолари. – 2020. – № 2. – С. 88–92.

4. Коваленков В. Г. Биоценотические связи и практическое использование энтомофагов в интегрированных программах оптимизации агроэкосистем // Известия ТСХА. – 2007. – Вып. 3. – С. 55–63.

5. Медведев Л. Н. Почвенные ловушки и их применение в энтомологии // Энтомологическое обозрение. 1949. Т. 30, № 1–2. С. 56–63.

6. Мустафакулов Х. Роль сорной растительности при формировании полезной энтомофауны агробиогеоценозов Ферганской долины // Universum: химия и биология. – 2013. – № 4.

7. Мухторов А. Влияние изменения климата на сельскохозяйственное производство и некоторые пути адаптации // Экономика и управление. – 2016.

8. Хўжаев Ш. Т. Ўсимликларни зараркунандалар ва касалликлардан ҳимоя қилиш: ўқув қўлланма. – Тошкент: "Фан ва технология", 2016. – 185 б.

К ОПУСТЫНИВАНИЮ ЗЕМЕЛЬ В АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Сметанин В.И.
ФНЦ ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, г. Москва
e-mail: smetanin2000@yandex.ru

Аннотация: Опустынивание - широко распространённая проблема на засушливых территориях юга России в том числе и Астраханской области. Целью работы ставилось выявить факторы, закономерности вызывающие процессы опустынивания (дезертификацию) земель в природно-климатических условиях Астраханской области и наметить мероприятия по борьбе с этим явлением.

Для выполнения этой работы использовались следующие подходы: анализ научной литературы, синтез данных, системно-структурный и картографический метод анализа, визуальные наблюдения.

Ключевые слова: климат, атмосферные осадки, водные ресурсы, речной сток, гидрографическая сеть, подземный водоносный горизонт, почва, капиллярная канва, деверсификация, дезертификация.

TO THE DESOLATION OF LANDS IN THE ASTRAKHAN REGION

Smetanin V. I.
Federal Scientific Center FSBI All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow
e-mail: smetanin2000@yandex.ru

Abstract. Desertification is a widespread problem in the arid areas of southern Russia, including the Astrakhan region. The purpose of the work was to identify the factors and patterns that cause the processes of desertification (desertification) of lands in the natural and climatic conditions of the Astrakhan region and to outline measures to combat this phenomenon.

To carry out this work, the following approaches were used: analysis of scientific literature, data synthesis, system-structural and cartographic methods of analysis, visual observations.

Keywords: climate, precipitation, water resources, river flow, hydrographic network, underground aquifer, soil, capillary canvas, diversification, desertification.

Введение

Известно, что опустынивание – это процесс деградации земель в аридных зонах. Процессу опустынивания подвержены территории с жарким климатом и минимальными осадками - годовая сумма которых не превышает 200…50 мм.

Территории, расположенные в аридной зоне Юга России подвержены деградации земель, связанной с проявлением процессов засоления, ветровой эрозией, зарегулированием речного стока Волг-Камского бассейна, загрязнением почв и подпитыванием долины минерализованными ирригационными грунтовыми водами, что также приводит и к ксерофитизации пойменных лугов, и усыханию прирусловой древесно – кустарниковой растительности.

Почвенный слой и растительный покров в таких зонах слабо развиты и покрывают обычно меньше половины открытой поверхности почвы, а в отдельных случаях - практически отсутствуют. Воды в подземных водоносных горизонтах, как правило, минерализованы. Подобные природные условия приводят к деградации почвы, потере ею плодородия, уменьшению биоразнообразия и при воздействии эрозионных ветров в конечном итоге - к опустыниванию территорий [1].

Рассматривая процесс опустынивания в Астраханской области, выделим основные факторы, влияющие на деградацию земель. Во-первых, это природно-климатические условия Астраханской области, табл. 1. И как видно из таблицы 1, малое количество атмосферных осадков (225 мм/год и менее), высокая среднегодовая температура воздуха жаркого месяца 29,5°С и -3,7°С – холодного, при среднегодовой скорости 2,7 м/с и максимальных скоростях ветра до 33 м/с, способствуют процессам деградации земель в аридных зонах.

Кроме природно-климатических условий, способствующих деградации земель в Астраханской области, оказывает формируемая на водосборе антропогенная нагрузка. Это результат уменьшения речного стока в низовье реки Волга, обмеление Каспийского моря, рост промышленного производства, добыча полезных ископаемых, развитие орошаемого земледелия и животноводства, нерациональное размещение отходов производства и потребления и другие виды хозяйственной деятельности.

Таблица 1 - Природно-климатические среднегодовые показатели, по данным Астраханского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды - филиал ФГБУ "Северо-Кавказское УГМС"

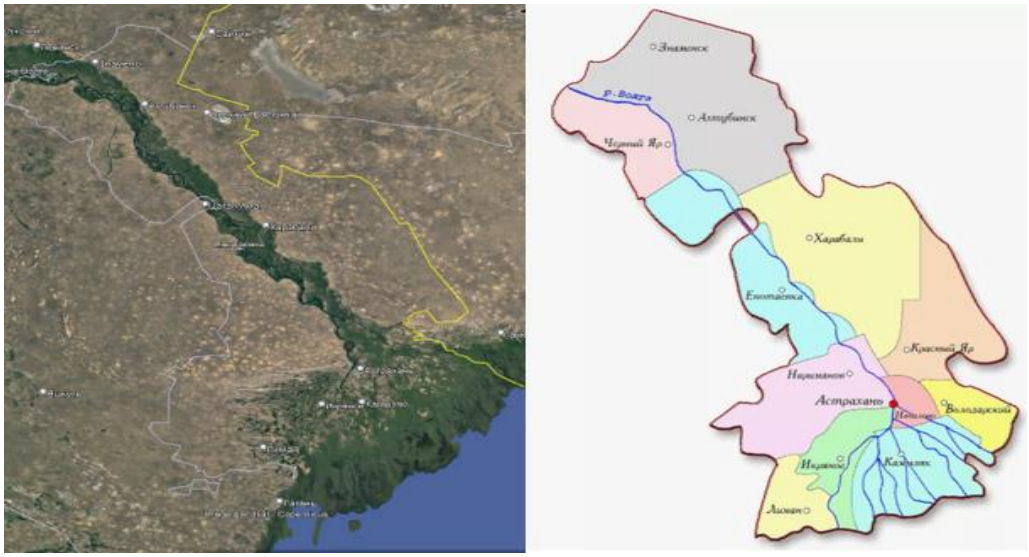
№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значения
1	Среднегодовое количество осадков	мм	≤ 225
2	Средняя температура воздуха: жаркого месяца составляет холодного	°С °С	29,5 -3,7
3	Среднегодовая скорость ветра:	м/с	2,7
4	Среднемесячная наибольшая скорость ветра:	м/с	3,1
5	Максимальная скорость ветра: без порывов с порывами	м/с м/с	30 до 33
6	Наибольшее число дней с сильным ветром более 15 м/с в году:	дни	48
7	Направления ветра наибольшей среднегодовой повторяемостью из восьми румбов: восточное западное	% %	24 16
8	Растительный покров: слабо развит и покрывает открытую поверхность отсутствует	% %	<50 0
9	Минерализация грунтовых вод в зависимости от степени засолённости подстилающего аллювия и удалённости от русел водотоков	г/дм^3	0,6… 34,7
10	Подземные воды часто минерализованы: в хвалынских отложениях, в хазарских отложениях	г/дм^3 г/дм^3	3–15 0,5–10

Материалы и методы исследований.

В середине 2021 года Астраханскую область накрыла мощная песчаная буря, которая послужила ярким сигналом-напоминанием о важности срочного принятия мер по сдерживанию деградационных процессов, способствующих опустыниванию земель Астраханского региона и юга России в целом. Несмотря на это, в сентябре 2024 года после длительного периода невмешательства и бездействия подобная картина повторилась.

Как показывают наблюдения, на интенсивность опустынивания земель в Астраханской области играет румбовая направленность ветров с наибольшей среднегодовой повторяемостью. Например, суммарная направленность ветров по румбам СВ, В, ЮВ, составляющая 47%, способствует опустыниванию земель, расположенных на левобережной стороне Волги. Суммарная направленность ветров по румбам ЮЗ, З, СЗ, составляющая 35%, способствует опустыниванию земель, расположенных

на левобережной стороне Волги. Это подтверждается и спутниковым снимком, рис. 1 [1].



а б

Рис. 1 - Спутниковая и общая карта районирования Астраханской области: а – снимок со спутника; б – схема районирования

На снимке, выполненном со спутника в 2021 году, показана густая сеть вкраплений желтого цвета, свидетельствующая об очагах опустынивания. Из картографического снимка видно, что на западной (правобережной) части Астраханской области активизация процессов опустынивания сопряжена с преобладающими ветрами, дующими с западного направления – это территории Наримановского, Енотаевского и Лиманского районов. На восточной (левобережной) части – активизация процессов опустынивания сопряжена с преобладающими ветрами, дующими с восточного направления – это территории Харабалинского, Красноярского и северной части Володарского районов (рис. 1). Деградация земель сопровождается потерей плодородных земель, вызывая экономическую и социальную нестабильность в затронутых районах [3, 4, 5]. В Наримановском районе отдельные территории проходят стадию опустынивания. Песчаные бури, перемещая песчаные дюны ветром приводят к росту барханов, засыпающими населенные пункты и сельхозугодия, рис.2.



а **б**

Рис. 2 - Опустынивание земель: а - песчаная буря со стороны Калмыкии в 2024г; б - последствия песчаных бурь в Астраханской области (в районе п. Барханное) (свободный доступ интернет, ii)

Все причины, вызывающие и усиливающие опустынивание земель в Астраханской области, можно разделить на природного, природно-техногенного и антропогенного характера, рис. 3.



Рис. 3 - Структурно-логическая модель основных причин, способствующих активизации опустынивания земель в Астраханской области

К причинам природного характера можно отнести избыточную солнечную радиацию, высокие температуры окружающего воздуха в летний период и низкие - зимой, недостаток осадков, дефицит влаги, высокая испаряемость, которые формируют специфический климат в Астраханском регионе. Не менее важным фактором,

вызывающим опустынивание, является активный ветровой режим, сильные ветры активизируют дефляционные процессы и способствуют разрушению верхнего слоя почвы.

К природно-техногенным причинам можно отнести изменение речного стока реки Волга ниже створа Волжской ГЭС, вызвавшее обмеление гидрографической сети, ирригацию, животноводство, фито и зоогенные факторы, снижение уровня воды в Каспии и др.

К причинам антропогенного характера деградации можно отнести формирование техногенной нагрузки на земли, расположенные в местах добычи полезных ископаемых, несанкционированного размещения отходов производства и ТКО, стихийную прокладку технологических степных дорог без твердого покрытия и многие другие процессы, включая и урбанизацию.

Основной причиной дезертификации земель служит обезвоживание капиллярной каймы в корнеобитаемом слое почвы, приводящее к потере растительного покрова, вызванное как неблагоприятными климатическими условиями, так и снижением уровня грунтовых вод на водосборе за счет изменения водного режима реки Волга и понижения уровня воды в Каспии. При этом следует учитывать и агрофизические свойства почв Астраханской области, расположенные в Прикаспийской низменности. Почвы достаточно разнообразны, состоят из малопродуктивных засолённых, солонцеватых и заболоченных почв, которые занимают около 80% территории, а также плодородных аллювиальных почв поймы и дельты Волги [6]. Земли характеризуются маломощным почвенным слоем, что делает агроландшафты неустойчивыми. Любое негативное воздействие на почвы способствует их деградации, провоцирует активизацию процессов опустынивания территорий с увеличением открытых поверхностей [6].

Угроза опустынивания в Астраханской области возникла вначале прошлого столетия. Одной из причин обострения данной проблемы послужило зарегулирование и перераспределение части стока реки Волга созданием каскада гидроузлов на реке Волга, включая Волгоградское водохранилище. Ниже створа Волжской ГЭС многие из водных объектов обмелели, некоторые исчезли. Интенсивное развитие орошаемого земледелия, включая рисосеяние, привело к изменению водного, воздушного и солевого режимов в верхних горизонтах почв. Например, в Астраханской области ирригационные процессы нередко приводят к формированию экосистем солончакового типа. При подъёме подземных вод к поверхности земли и расположении их на глубине 1,0…1,5м формируется капиллярная кайма, из которой влага испаряется, а соли остаются в почве. Постепенное накопление солей в почве приводит к смене растительного покрова галофитами, флористические сообщества быстро меняются, и пустынные полынные

кустарники заменяются луговыми, болотными и солончаковыми группировками в течение короткого времени. Засоленные земли и солончаки, подверженные ветровой эрозии, привносят определенный вклад в опустынивание земель.

Не малую роль в опустынивание земель привносит выпас скота в количестве, превышающем допустимые нормы. Большую нагрузку на почву и растительный покров оказывают овцы, чем крупно рогатый скот. Кроме низкого поедания овцами растений, не позволяющего им вновь быстро восстановить биомассу, потравленную животными, накопить питательные вещества, обсемениться в полном объеме. В силу своеобразного строения копыт у овцы и сравнительно малой ее массы в процессе поедания ею травы передаются достаточно высокие механические воздействия и на почву, и на не потравленные растения, в результате чего верхний слой почвы разрыхляется, а раздавленное растение, как правило погибает. Разрыхленный копытами верхний плодородный слой почвы в ветренную погоду выдувается, а в травостое исчезают ковыли и другие ценные злаки и бобовые, уступая место сорным травам. Эти изменения делают почву менее способной поддерживать естественные экосистемы, способствуют эрозии и ускоряют процессы опустынивания, угрожая биоразнообразию и устойчивости степных ландшафтов.

Не малую лепту в формирование антропогенной нагрузки на окружающую среду низовья Волги внесло строительство в Наримановском районе Астраханского картонно-целлюлозного комбината, для работы которого вели заготовку камыша, буйно растущего в те годы в дельте. Заготовку камыша осуществляли механизированным способом с использованием косилок, навешиваемых на гусеничные трактора, которые в процессе скашивания разрушали корневую систему. Из-за разрушения корневой системы, обмеления гидрографической сети дельты снизилась урожайность биомассы камыша, что в последствии послужило одной из причин отказа от использования его для производства целлюлозы и последующего прекращения работы самого АЦКК.

Возможно несколько бы меньшим был бы нанесен ущерб окружающей среде в случае работы Астраханского вододелителя, расположенного на реке Волге в Астраханской области в городе Нариманов (в 50 км к северу от Астрахани), предназначенного для распределения волжской воды между рукавами Волги, Бузана для обводнения Волго-Ахтубинской поймы и восточной части дельты Волги. Вододелитель при работе обеспечивал подпор воды уровнем 4,5 метра. Вододелитель был построен в 1963-1977 годах. С конца 1980-х не эксплуатируется.

Подпор необходим для того, чтобы при весенних паводочных расходах, сбрасываемых через Волжскую ГЭС не менее 24000 $м^3/с$, обеспечивался расход около 9000 $м^3/с$ в восточную часть дельты для затопления нерестилищ в нужный период времени по рыбоводному графику. Это позволяло бы распределять количество

подаваемой воды в рукава, Бузан и Волгу, в зависимости от потребности. При необходимости больше воды подать в восточную часть, Волжский рукав перекрывался затворами, примерно на 20…30 дней, уровень в верхнем бьефе повышался и основной объем воды направлялся в Бузан. Суда в этот период проходили бы через шлюзы. При работе вододелителя решался бы рыбохозяйственный вопрос и частично снижалась бы разгрузка грунтовых вод на участке регулируемого подпора с решением вопроса обводнения Волго-Ахтубинской поймы.

На подходе к морю, Волга начинает разделяться на множество водотоков. В Каспий впадает около 600 различных "ериков" и рукавов и там, где они впадают, заканчивается дельта и начинается авандельта («раскаты»), раскинувшиеся в среднем более чем на 10 тысяч км^2. «Раскаты» обмелели до 40…70 см, а сама дельта Волги постепенно зарастает тростниковыми островами. В основе этих изменений лежит комплекс факторов, одним из которых служит падение уровня Каспийского моря. Средний темп падения уровня за последние 10 лет составляет 7,9 см/год, что в 1,8 раза выше, чем в 1959–1977 годы. (Уровень воды в Каспийском достиг -29м по БСК)

Волга несет в себе твердый сток, который в зоне авандельты начинает осаждаться, образовывая новую сушу. [7]

В связи с изменением гидрологических процессов в низовье реки Волга и постоянно нарастающей антропогенной нагрузки на экосистему в сложившихся природно-климатических условиях произошла деградация степных фитоценозов и развитие дефляционных процессов на площади 1,3 млн га, из которых 0,4 млн га - развеваемые ветром пески. [1, 6].

Текущие тенденции деградации земель также связаны с фито-дезертификацией, что выражается в сокращении полезных пастбищных растений, таких как злаки и бобовые, и их замена рудеральными видами (ядовитыми, такими как гармала и верблюжья колючка, практически не поедаемыми домашними животными, а также как полынь песчаная и солянки).

Фитогенные факторы тоже оказывают влияние на увеличение площади опустыненных земель. Растительность области отличается низкорослостью, разреженностью и низкой продуктивностью. Разреженность растительности снижает задернованность почв, что делает их более уязвимыми к водной и ветровой эрозии.

Ветровая эрозия является одним из ключевых факторов, способствующих образованию очагов опустынивания. При сильных ветрах верхний плодородный слой почвы разрушается и уносится, что значительно снижает способность почвы удерживать влагу и питательные вещества. В результате, растения теряют возможность укореняться

и получать достаточное количество влаги и питательных веществ, что ведет к деградации растительного покрова.

Процессу опустынивания способствуют и существующие зоогенные факторы, такие как миграции саранчи, особенно активизирующаяся в последние годы. Саранча уничтожает растительный покров на больших территориях, и до такой степени, что овцам после саранчи на пастбищах делать уже нечего. (очередное нашествие саранчи произошло в июне 2026 года).

Антропогенные факторы также имеют большое значение для развития процессов опустынивания земель, особенно в условиях аридных и субаридных природных климатических зон. Все виды человеческой деятельности, влияющие на процессы опустынивания, можно классифицировать как экономические, социальные, военные и юридические, но большее влияние на прогрессирование опустынивания земель в Астраханской области оказывают антропогенные причины. На территории Астраханской области учтено 11 месторождений углеводородного сырья на суше и разведано 13 многопластовых месторождений углеводородов в Российском секторе Каспийского моря; 33 месторождения самосадочной соли; 1 месторождение песка стекольного; 2 месторождения гипса; 5 месторождений лечебных грязей; 2 месторождения йода; 1 месторождение брома (забалансовые); 25 месторождений подземных вод из них 15 питьевых, 5 технических, 5 минеральных.

Любое освоение месторождений полезных ископаемых влечет за собой образование техногенных ландшафтов, формирующих антропогенную нагрузку на все компоненты природной среды, провоцирующую опустынивание земель Северного Каспия, в том числе при добыче нефти на суше.

Астраханское газоконденсатное месторождение было открыто в 1976 году, его запасы оценивали в 2,5 трлн $м^3$ газа и 400 млн т конденсата. В 1981 году был создан Астраханский газовый комплекс, центром которого стал Астраханский газоперерабатывающий завод (АГПЗ). Мощность завода составляет около 12 млрд $м^3$ газа и чуть более 4 млн т нефти и газового конденсата в год. В настоящее время Добыча ведется в основном на АГКМ), рис. 4.

Технология добычи газового конденсата в Астраханской области включает: сбор пластового газа от эксплуатационных скважин; передачу накопившегося конденсата на ГПЗ; разделение жидкой фазы в трёхфазном сепараторе на углеводородный конденсат и пластовую воду; отвод углеводородного конденсата на установку стабилизации конденсата или на подземное хранение.



а **б**

Рис.4 - Астраханский газоперерабатывающий завод: а – сооружения обогащения газового конденсата; б – погрузка серы в железнодорожные вагоны

Месторождение характеризуется большой глубиной залегания углеводородов (более 4000 м), сложными условиями добычи (пластовым давлением 620 атмосфер и пластовой температурой около 120°С), повышенным содержанием токсичных примесей, требующих повышенных мер безопасности при добыче сырья и первичной его очистки. Кроме того, месторождение располагается в экологически чувствительных зонах (бассейн Волги).

На участке строительства АГПЗ были выполнены строительно-планировочные работы. На месте бывших степей построены завод, административные и жилые здания, созданы полигоны для размещения отходов и хранения серы, подземные хранилища сырья, токсичных отходов, проведены продуктопроводы, транспортные магистрали и т.д. В промысловой зоне АСТКМ размещены геологоразведочные и эксплуатационные скважины.

Для хранения газа, конденсата и продуктов переработки созданы подземные емкости методом подземного взрыва. Для утилизации загрязненных сточных вод АГПЗ способом выщелачивания построены подземные хранилища.

В процессе добычи, осуществляемая закачка промышленных стоков в глубинные пласты, сопровождается мощным геоэкологическим воздействием на литосферу, порождает своеобразные формы глубинного геотехноморфогенеза, а в результате отбора газа и конденсата из залежи происходит уплотнение пород коллекторов и перекрывающих их горных пород, что приводит к проседанию земной поверхности над месторождениями, нередко сопровождающееся техногенными сейсмическими процессами, провоцирующими аварийные ситуации на трубопроводах и на сооружениях завода. Значительные просадки поверхности земли в отдельных местах приводят к подтоплению территорий.

Извлекаемая из природного газа смесь кислых газов наполовину более состоит из сероводорода, остальная часть — из углекислого газа, небольшого количества серооксида углерода и углеводородов (метан, этан). Эта смесь кислых газов перерабатывается на заводе с целью получения из нее элементарной серы. Побочный продукт деятельности АГПЗ — сера (комовая, жидкая, гранулированная), что не всегда обеспечивается экологически безопасное хранение нереализованных излишков продукции.

Добыча газового конденсата в Астраханской области оказывает негативное воздействие на атмосферный воздух, почву, поверхностные и подземные воды. Вследствие недостаточной очистки отходящих газов, а также при аварийных выбросах, в атмосферном воздухе систематически обнаруживаются токсичные вещества, включая повышенное содержание соединений серы и азота, которые в виде кислотных осадков, загрязняют почву. На отдельных участках территории Астраханской области произошла устойчивая сульфуризация почв. К локальному загрязнению почв и грунтовых вод приводит складирование буровых шламов.

Производственные стоки, включая пластовые воды, попадая в подземные горизонты, вызывают подъём уровня грунтовых вод, что приводит к формированию техногенных озёр. Источником загрязнения окружающей среды являются не только добыча и переработка, но и транспортировка продукции [7].

На территории российского сектора Каспийского моря открыто семь нефтегазовых месторождений: имени Ю. Корчагина, Ракушечное, Хвалынское, 170-й км, Сарматское, Инчхе-море. По оценкам экспертов, их запасы составляют не менее 1 млрд т нефти и не менее 1 трлн $м^3$ газа.

Основная проблема астраханской нефти — ее высокая плотность, что не просто тяжелая, а именно битуминозная нефть, сложная в добыче и очистке. Обычный станок-качалка не в состоянии поднять из скважины такую нефть, для этого требуются более мощные установки. При выделении из нее мазута остается мощный солевой осадок, а в полученном битуме большое содержание парафина, что создают технические и экологические проблемы.

При добыче нефти на шельфе нефтедобывающие компании обязаны соблюдать принцип «нулевого» сброса отходов производства образующихся на буровых платформах в водную среду морей и океанов. Все отходы должны вывозиться для утилизации на специально подготовленные береговые базы или полигоны. На рис. 5 показана буровая платформа.

При добыче нефти на шельфе часть нефтесодержащих отходов попадает на водную поверхность образуя тончайшую нефтяную пленку, нарушающую кислородный обмен между водной средой и атмосферным воздухом. Это приводит к гибели личинок комаров при выходе их из воды, являющихся основным кормом для разнообразной ихтиофауны северной части Каспия. Нет корма – нет рыбы.



Рис.5 - Добыча нефти на шельфе
https://www.kommersant.ru/doc/1031501

Социальным фактором, увеличивающим антропогенную нагрузку на окружающую среду, является урбанизация территорий. По данным Астраханьстата, численность населения региона по состоянию на 1 января 2024 года составила 946 533 человека. В городских поселениях проживают 604,6 тыс. астраханцев, 341,9 тыс. – в сельской местности [8]. В летний период за счет развития туризма численность населения увеличивается, соответственно растет водопотребление, водоотведение и образование ТКО. Образующие при этом ТКО оказывают негативное воздействие на атмосферный воздух, почву, поверхностные и грунтовые воды в местах их временного накопления и депонирования. Наибольший ущерб окружающей среде наносит неорганизованный туризм.

Результаты и их обсуждение. Причины, вызывающие опустынивание земель в Астраханской области, носят природный, природно-техногенный и антропогенный характер. Причинами природного характера служат избыточная солнечная радиация, высокие температуры окружающего воздуха в летний период и низкие - зимой, недостаток осадков, дефицит влаги, высокая испаряемость, которые формируют специфический климат в Астраханском регионе, а также активный ветровой режим,

сильные ветры активизируют дефляционные процессы и способствуют разрушению верхнего слоя почвы.

Причиной природно-техногенного характера служит обмеление р. Волги, вызванное зарегулированием речного стока Волго-Камского бассейна и режимом работы Волжской ГЭС. Зарегулированный годовой речной сток в нижний бьеф гидроузла в сравнении с естественным сократился на 7,4 км^3, весенний сток уменьшился на 42,3 км^3, а зимние энергетические попуски возросли на 34,4 км^3, более чем в 2 раза. Выбранный сценарий регулирования был обусловлен получением максимальной выработки электроэнергии, что нарушило естественный режим биопродукционного и температурного обводнения нерестовых массивов для полупроходных и туводных рыб.

Максимальная пропускная способность всех гидротурбин Волжской ГЭС составляет 15 145 м³/с. По данным Росводресурсов в 2023 году до 8 апреля (включительно) средние сбросные расходы на Волжской ГЭС составили 7200 ± 200 м^3/с. Далее гидроузел работал в режиме специального весеннего попуска, ежедневно увеличивая сброс воды на 2000 м^3/с. К 17 апреля среднесуточный сброс воды на Волжской ГЭС составил 26000±500 м^3/с, выйдя на максимум. В подобных случаях сброс воды на ГЭС осуществляется через гидротурбины и водосливную плотину. После достижения максимума среднесуточный сброс начал резко снижается и к 25 апреля вышел на «рыбную полку» со среднесуточным сбросным расходом Волжской ГЭС 16000±500 м^3/с, который продержался до 20 мая. Далее, начиная с 21 мая среднесуточный сброс со скоростью 1000 м^3/с ежесуточно снижался и 31 мая достигал 600±200 м^3/с. С 01.06.2023 по 10.06.2023 — среднесуточные сбросные расходы составляли 5000±200 м^3/с.

Известно, что разгар нереста, в среднем, наступает в начале мая при температуре воды 10…15°С, заканчивается - во второй половине мая при температуре 17…22°С. Температурный режим и уровень половодья Волги по декадам за 2023г приведен в табл. 2.

Таблица 2. Температурный режим и уровень половодья Волги по декадам за 2023 г. [7]

Декады	Май		Июнь	
	температура, ^{0}C	уровень, см	температура, ^{0}C	уровень, см
1	11,5	481	18,7	356
2	12,4	468	20,9	340[ч]
3	15,9	462	22,3	320

Продолжительность рыбохозяйственного половодья определяется отрезком времени между датами начала подъема и спада уровня воды, в течении которого происходит залитие нерестилищ в дельте р. Волги с учетом благоприятного

температурного режима нереста рыб. Рыбохозяйственное половодье за этот же период в среднем должен продолжаться 90 суток.

По результатам 2023 года объем стока р. Волги во II кв. составил 92,0 км^3, биопродукционный сток сократился на 5 км^3, продолжительность половодья наблюдалось в течение 51 суток, что ниже показателей естественного периода водности на 37 суток. Обводнение нерестовых массивов началось раньше наступления в реке нерестовых температур для полупроходных и туводных рыб. Даже при выдерживании «рыбной полки», но при температуре ниже 10°С, не являющейся благоприятной для нереста большинства рыб, рыбы икру не мечут. При наступлении благоприятного температурного режима рыбы мечут икру, в скором в этом промежутке времени упал нерестовый уровень, после схода воды часть невылупившихся личинок погибает, другая часть – из-за быстрого схода воды, оставаясь на суше, также погибает, третья – мальки, из-за отсутствия или недостатка пищи вне полой также обречена на погибель. И только малая часть малька выживает.

Подобная ситуация назревала в 2025 году. По данным КаспНИРХ для эффективного нереста полои должны быть залиты за 7-10 дней до начала размножения зашедших в них производителей рыб, Личинки рыб развиваются до стадии мальков, когда они становятся похожи на взрослых рыб, в течение 45-50 суток. При ожидаемом объеме — 69,1 км^3 и продолжительности половодья менее 30 суток, происходит быстрый спад воды с полоев, обсыхание отложенной на свежей растительности икры и гибель значительной части рыбной молоди на личиночных стадиях – у них просто нет времени подрасти.

Для многих видов рыб питательной средой служат водоросли, но из-за нестабильности уровней и низких температур воды многие виды водной флоры, являющиеся питательной средой для ихтиофауны, погибают, появляются тростниковые острова, замедляющие скорость течения и способствующие более интенсивному заилению русл водных объектов. Нет еды - нет рыб.

Также к причинам опустынивания земель природно-техногенного характера можно отнести ирригацию, животноводство, фито и зоогенные факторы, а таже снижение уровня воды в Каспии др.

Причинами деградации земель антропогенного характера служит формирование техногенной нагрузки в местах добычи полезных ископаемых, несанкционированного размещения отходов производства и ТКО, стихийная прокладка линейно-протяженных сооружений (степных дорог без твердого покрытия, прокладка продуктопроводов, линий электропередач) и др.

Все прямые и косвенные причины, вызывающие или усиливающие опустынивание земель в Астраханской области, направлены на уничтожение растительного покрова и активизацию дефляционных процессов за счет устранения капиллярной каймы в почвенном слое.

Для изменения ситуации необходим кардинальный разворот в направлении разработки и внедрения природоподобных технологий с использованием искусственного интеллекта, направленных на защиту экосистемы от неблагоприятных факторов, провоцирующих опустынивание и технологий, направленных на восстановление деградированных земель [9, 10].

Одной из природоподобных технологий, направленных на снижение процессов опустынивания земель в Астраханской области, может послужить реструктуризация управления сбросами воды Волжской ГЭС, перераспределив их в угоду обеспечения биопродукционного и температурного режимов обводнения нерестовых массивов для полупроходных и туводных рыб и улучшения состояния гидрографической сети.

Волжская ГЭС имеет установленную мощность 2734 КВт. В Астраханской области в год наблюдается более 200 солнечных дней, среднегодовая скорость ветра составляет 2,7 м/с, что способствовало освоению возобновляемой энергетики. В настоящее время функционируют 12 солнечных электростанций общей установленной мощностью около 285 МВт и ветропарк - 340,2 МВт, что составляет около 25,42% установленной мощности Волжской ГЭС.

Потребность в электроэнергии характеризуется большой неравномерностью в течение суток. В связи с большой неравномерностью потребления электроэнергии в течение суток возникает ряд проблем, максимум приходится на утренние и вечерние часы, в остальные - потребление снижается в разы. В любой энергосистеме в каждый момент времени должно соблюдаться равенство вырабатываемой и потребляемой электроэнергии. Пиковые нагрузки, как и базисные обеспечиваются энергоблоками, задействованными на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях, что не всегда удается достичь этого равенства.

Учитывая наличие в рассматриваемом регионе традиционных и возобновляемых источников энергии, появилась возможность отойти от традиционного управления сбросами воды Волжской ГЭС только в угоду гидроэнергетики. Целевой функцией управления должно быть обеспечение водными ресурсами нереста рыб в нужный период времени по рыбоводному графику, продолжительностью 90 суток с учетом температурного режима водной среды в местах нереста и гидрографической сети восточной дельты.

Продолжительность пиков в графиках суточного потребления электроэнергии составляет не более 3-4 часов в сутки. После прохождения пиков энергоблоки,

установленные на Волжской ГЭС, могут периодически отключаться, а в нужный момент включаться. В силу своей специфики гидроагрегаты, в отличие от всех остальных традиционных и других видов генерирующих устройств, запускаются и отключаются в течении короткого промежутка времени. Учитывая это, можно достичь цели более строгим управлением расходами сброса воды из водохранилища Волжской ГЭС в заданный период, обеспечивающими рыбохозяйственное половодье в течении 90 суток и температурный режим обводнения нерестовых массивов при щадящем режиме накопления воды в водохранилище, поступающей с Волго-Камского бассейна.

Маневрируя пусками и остановками гидроагрегатов, затворами поверхностных водосбросов в составе ГЭС и затворами, установленными на Астраханском вододелителе, после его «реанимации», можно достичь поставленной цели: обводнение нерестовых массивов, гидрографической сети, включая обводнение Волго-Ахтубинской поймы и как следствие снижался бы потенциал опустынивания земель в Астраханской области.

С наступлением весны сброс воды в нижний бьеф увеличивается примерно до Q=24000 $м^3/с$ и более, при вовлечении в работу Астраханского вододелителя, волжская вода делилась бы между рукавами Волги, Бузана, обводняя Волго-Ахтубинскую пойму, обеспечивая подпор воды на уровне 4,5 метра. При этом обеспечивался бы расход воды около Q = 9000 $м^3/с$ по реке Бузан в восточную часть дельты для затопления нерестилищ в нужный период времени по рыбоводному графику [11]. Кроме того, из-за подъема уровней волы в гидрографической сети можно достичь снижения градиента фильтрационного напора грунтовых вод на береговых склонах, способствующему сохранению накопленной влаги в капиллярной кайме корнеобитаемого слоя почвы за осенне-зимний и ранний весенний периоды времени года, что уменьшит дизертификацию земель в Астраханской области.

Выводы.

1. Продолжительные засухи, песчаные бури, вызванные изменением климата, рост промышленного производства и добыча полезных ископаемых, развитие экстенсивного орошаемого земледелия и животноводства, нерациональное размещением отходов производства и потребления, изменение водного режима в низовье реки Волга, понижение уровня воды в Каспийском море и другие виды хозяйственной деятельности в регионе способствовали росту дезертификации земель в Астраханской области, которая достигла критической отметки.

2. Природоподобной технологией, направленной на снижение деградационных процессов опустынивания земель в Астраханской области, может послужить изменение режима управления сбросами воды Волжской ГЭС, перераспределив их между гидроэнергетикой и другими отраслями-водопользователями.

3. Не следует забывать широко известные и проверенные на практике технологии закрепления песков, направленные на борьбу с опустыниванием, например, создание ветрозащитных лесных насаждений из генетически модифицированных культур устойчивых к засухе, жаре и процессам засоления. Для этих районов наиболее эффективным считается фитомелиорация пустынных территорий, включающая посадку томарикса, джузгуна, саксаула и других особо неприхотливых к засухе видов растений. однако их приживаемость оставляет желать лучшего – и составляет мнее 40%. Те, которые прижились, нуждаются в уходе, а выпавшие – замене.

Список литературы

1. Вайчулис Г. В., Быстрова И. В., Смирнова Т. С. Опустынивание земель южных регионов России. Возможные пути решения проблемы // Научные высказывания. 2021. №2 (2). С. 29-31. URL: https://nvjournal.ru/article/39-opustinivanie-zemel-yuzhnikh-regionov-rossii-vo

2. Изменения климата / Астрахань, Астраханская Область // Россия, 46.35°C 48.04°B, -12м над у.м. URL: https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/%D0%90%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%8C_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%8F_580497

3. Андреева О.В., Дементьева Н.А. Современные проблемы опустынивания, деградации земель и засух в контексте деятельности КБО ООН (30 лет развития) // Степи Северной Евразии: материалы X международного симпозиума 2024.

4. https://vk.com/wall-34867240_156628

5. В.И. Сметанин, Хунас Каси Проблема опустынивания земель как один из основных вызовов современному человечеству // Природообустройство №3, 2024, с. 44.-52

6. Доклад «Об экологической ситуации в Астраханской области в 2023 году», г. Астрахань, 2024г.

7. https://www.kommersant.ru/doc/5914357

8. Агрохимическая характеристика почв Астраханской области: Справочник / Ю. Б. Салина [и др.]. – Астрахань, 2020. – 68 с.

9. Резолюция A/RES/78/154 Осуществление Конвенции Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием в тех странах, которые испытывают серьезную засуху и/или опустынивание, особенно в Африке (2023).

10. Деградация земель, опустынивание и устойчивое землепользование: концепции и термины / Г. С. Куст, О. В. Андреева, И. С. Зонн [и др.]; под редакцией Г. С. Куста; Институт географии РАН, Научно-координационный центр по борьбе с опустыниванием и смягчению последствий засухи имени Н. Ф. Глазовского. - Москва: МАКС Пресс, 2024. - 205, [1] с.; - ISBN 978-5-317-07154-7.

11. https://dzen.ru/a/YfpFj1vXohf8ZFUI

Антропогенная нагрузка и качество воды

СОСТОЯНИЕ ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ТРАНСГРАНИЧНОЙ Р. УРАЛ: ТЕРМОДИНАМИКА

Трофимчук М.М., *Кондакова М. Ю.*
Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону
e-mail: m.trofimchuk@gidrohim.mecom.ru

Аннотация: Проблемы оценки качества трансграничных водных объектов не связаны с их трансграничным статусом, а обусловлены недостатками научных подходов. К сожалению, до настоящего времени основой для оценки качества воды служат многократно раскритикованные предельно допустимые концентрации. Качество воды рассматривается в первую очередь с антропоцентристских, пользовательских позиций, а в последнюю – с экосистемных. Предлагается экосистемный способ оценки состояния водных объектов на основе термодинамических параметров. Такой подход обеспечивает адекватную оценку состояния экосистем, сопоставимость и единообразную трактовку оценок, не связанную с особенностями водных объектов.

Ключевые слова: Водные экосистемы, оценка состояния, концентрация кислорода, температура, энтропия.

STATE OF THE AQUATIC ECOSYSTEM OF THE TRANSBOUNDARY URAL RIVER: THERMODYNAMICS

TrofimchukM.M., *Kondakova M.Y.*
Federal state budget institution «Hydrochemical institute», Roston-na-Donu, Russia
e-mail: m.trofimchuk@gidrohim.mecom.ru

Abstract: Problems in assessing the quality of transboundary water bodies are not related to their transboundary status, but are due to shortcomings in scientific approaches. Unfortunately, water quality assessments have so far relied on widely criticized maximum permissible concentrations. Water quality is considered primarily from an anthropocentric, user-centered perspective, and only lastly from an ecosystem-based perspective. An ecosystem-based approach to assessing the condition of water bodies based on thermodynamic parameters is proposed. This approach ensures an adequate assessment of ecosystem status, comparability, and a consistent interpretation of assessments, unrelated to the specific characteristics of the water bodies.

Keywords: aquatic ecosystems, dissolved oxygen concentration, water temperature, entropy index.

Мониторинг состояния и загрязнения природных вод, реализуемый в настоящее время в России и Казахстане, основан на сходных подходах [1, 2]. В рамках этих подходов в известной мере успешно решается задача определения качества воды водных объектов по совокупности ее физико-химических свойств, включая содержание загрязняющих веществ. Основное внимание уделяется санитарно-гигиеническим и рыбохозяйственным требованиям к качеству воды. Одной из проблем такого подхода является способ оценки общего уровня загрязнения на основе данных о концентрациях загрязняющих веществ. В России для такой оценки рассчитывают удельный комбинаторный индекс загрязнения воды (УКИЗВ), в Казахстане – аналогичный индекс загрязнения воды (ИЗВ). Недостатки этих индексов в том, что в основу этих оценок в конечном итоге положена система предельно допустимых концентраций (ПДК).

В настоящее время общепризнано, что используемые методы оценки загрязнения и состояния водных объектов, основанные на сравнении концентраций загрязняющих веществ с предельно допустимыми концентрациями или частными показателями отклика отдельных биотических компонентов водных экосистем, недостаточны [3 – 5]. Такой подход не учитывает как минимум двух обстоятельств: возможность адаптации экосистем к негативным воздействиям и возможные трансформации загрязняющих веществ в природных водах, влекущие изменение их токсических свойств.

Изначально при организации системы мониторинга устанавливалась необходимость не только наблюдений за источниками и факторами антропогенных воздействий, но прежде всего за реакцией экосистем на эти воздействия [6]. Косвенные оценки состояния водных экосистем получают в рамках подсистемы биологического мониторинга на основе применения архаичных методов биоиндикации, опирающихся на экспертные оценки биоразнообразия, основанные на наличии в составе гидробиоценозов тех или иных индикаторных групп. Ограниченность этих методов в оценке состояния водных экосистем обусловлена не только перечнем видов-индикаторов, не характерных для большинства водных объектов России, но и использованием в качестве индикаторов состояния экосистем биотических структур, уровень организации которых ниже экосистемного. Полноценная реализация этих методов требует участия высококвалифицированных кадров гидробиологов-систематиков и оснащения лабораторий специальной справочной литературой и современной микроскопической техникой. На сегодняшний день эта задача не решена в необходимом объеме и вряд ли будет решаться в перспективе.

Решение проблемы интегральной экологической оценки состояния водных объектов лежит на наш взгляд в области термодинамики с ее макроскопическими подходами в описании сложных самоорганизующихся систем.

Ранее авторами работ [7 – 9] была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность оценки состояния водных экосистем на основе продукционно–деструкционных показателей в термодинамической интерпретации. Основой для расчета термодинамических параметров, характеризующих обобщенное состояние водных экосистем, могут служить гидрохимические показатели такие, как концентрация растворенного кислорода и температура воды [10].

Ранее был предложен теоретически обоснованный метод оценки состояния водных экосистем на основе изменения энтропии водных экосистем – энтропийного индекса, который рассчитывается по формуле $\Delta S_t = \ln T_2/T_1$, где T_1 – температура воды в водном объекте; T_2 – температура воды, соответствующая 100% насыщению

кислородом при измеренной концентрации кислорода [11]. В основе метода лежит представление о биотическом балансе вещества и энергии, о сбалансированности процессов первичного фотосинтетического продуцирования и деструкции органического вещества. Изменение баланса, вызванное как естественными причинами, так и негативными антропогенными воздействиями, сопровождается соответствующим изменением энтропии водной экосистемы. Таким образом, изменение энтропии экосистемы (энтропийный индекс) характеризует изменение состояния экосистемы. Рост энтропии свидетельствует об ухудшении условий существования экосистем, усилении процессов деградации.

В рамках данного подхода была разработана шкала оценки экологического состояния экосистем, включающая пять градаций – от предельно благополучного (значение энтропийного индекса от -0,123 до 0,062) до предельно неблагополучного (значение энтропийного индекса от 0,250 до 0,312) (таблица 1) [11].

Таблица 1 - Классификация экологического состояния

Класс состояния	Энтропийный индекс	Экологическое состояние
1	-0,123 – 0,062	Предельно благополучное
2	0,063 – 0,124	Благополучное
3	0,125 – 0,187	Удовлетворительное
4	0,188 – 0,249	Неблагополучное
5	0,250 – 0,312	Предельно неблагополучное

Следует отметить, что только предельные значения представленной шкалы теоретически обоснованы. Равномерное разбиение шкалы на пять классов в известной мере условно.

Результаты оценки состояния водных экосистем (по энтропийному индексу) для более чем 100 водных объектов России, находящихся в различных природно-климатических зонах, с разным уровнем загрязнения и химическим составом воды, позволили выявить ряд характерных особенностей динамики состояния водных экосистем. [11, 12]. Были отмечены:

- несоответствие уровня загрязнения, и степени благополучия экосистемы. Причина очевидна. Степень загрязнения характеризует качество окружающей среды, а отклонение энтропии от нормы – состояние биоты, обладающей способностью к адаптации к данной окружающей среде;

- в благополучных экосистемах минимален размах колебаний энтропийного индекса, что является проявлением стабильного сбалансированного функционирования экосистемы;

- в благополучных экосистемах отчетливо проявляется сезонная динамика: в холодное время года значения энтропийного индекса возрастают, а при повышении температуры и возобновлении фотосинтеза – снижаются;

- в некоторых случаях сезонная цикличность может сохраняться, но увеличивается размах колебаний, что может быть проявлением резистентной устойчивости экосистем;

- существенное ухудшение качества воды проявляется в нарушении сезонной цикличности, появлении хаотичности в динамике и возрастании средних значений энтропийного индекса.

Указанные выше закономерности, помимо формализованной оценки, и лежат в основе оценки состояния экосистем. Оценка состояния рек бассейна р. Урал была выполнена в рамках темы «Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной реки Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык) [13].

Термодинамическое состояние водных экосистем р. Урал и его притоков на всех пунктах наблюдений оценивается как предельно благополучное. Среднемноголетние значения энтропийного индекса лежат в пределах 0,008 – 0,048 (таблица 2). Во всех случаях отчетливо проявляется сезонная динамика: в холодное время года значения энтропийного индекса возрастают, а при повышении температуры и возобновлении фотосинтеза – снижаются. Такой характер динамики свидетельствует об адаптации водных экосистем к сложившимся условиям окружающей среды.

В то же время очевидны различия в динамике энтропийного индекса в разных пунктах, выражающиеся в размахе значений сезонных колебаний. Эти особенности динамики позволяют ранжировать состояние водных экосистем р. Урал и притоков в рамках среднего высокого уровня благополучия и соответственно предположить степень антропогенного влияния источников загрязнения на различных участках водных объектов.

Уровень нестабильности может быть формально охарактеризован с помощью коэффициента вариации – статистики, учитывающей значения средней и стандартного отклонения (таблица 2).

Самые высокие значения энтропийного индекса отмечены для реки Урал в двух контрольных пунктах г. Верхнеуральск (таблица 2, рис. 1). Выше города – 0,040, ниже города – 0,048. Следует отметить, что при средних значениях энтропийного индекса, соответствующих предельно благополучному состоянию, на протяжении большей части периода наблюдений наблюдались многочисленные всплески значений до уровня неблагополучного состояния. Начиная с 2002 года ситуация улучшилась: состояние экосистемы стабильно находится в пределах благополучного.

Таблица 2 - Средние многолетние значения энтропийного индекса и коэффициента вариации

Пункт наблюдений	Энтропийный индекс, ΔS_t	Коэффициент вариации, %
р. Урал, г. Верхнеуральск	0,040	126
р. Урал, г. Верхнеуральск, ниже	0,048	117
р. Урал, г. Магнитогорск, 13 км выше г. Магнитогорск	0,016	144
р. Урал, г. Магнитогорск, 18 км ниже г. Магнитогорск	0,008	512
р. Урал, с. Березовка	0,035	112
р. Урал, г. Орск, 1 км выше г. Орск	0,029	128
р. Урал, г. Орск, 5,4 км ниже впадения ручья.	0,028	131
р. Урал, г. Орск, 6,5 км ниже г. Орск	0,027	135
р. Урал, г. Орск, 20,3 км ниже г. Орск	0,027	137
р. Урал, г. Оренбург, в черте г. Оренбург	0,032	128
р. Урал, г. Оренбург, 2 км ниже г. Оренбург	0,028	125
р. Урал, г. Оренбург, 6 км ниже г. Оренбург	0,031	123
р. Урал, п. Илек, 1 км выше п. Илек	0,034	107
р. Большой Кизил, с. Бурангулово	0,032	44
р. Сакмара, с. Акъюлово	0,032	45
р. Зилаир, с. Зилаир	0,033	45
р. Большой Ик, с. Мраково	0,032	52

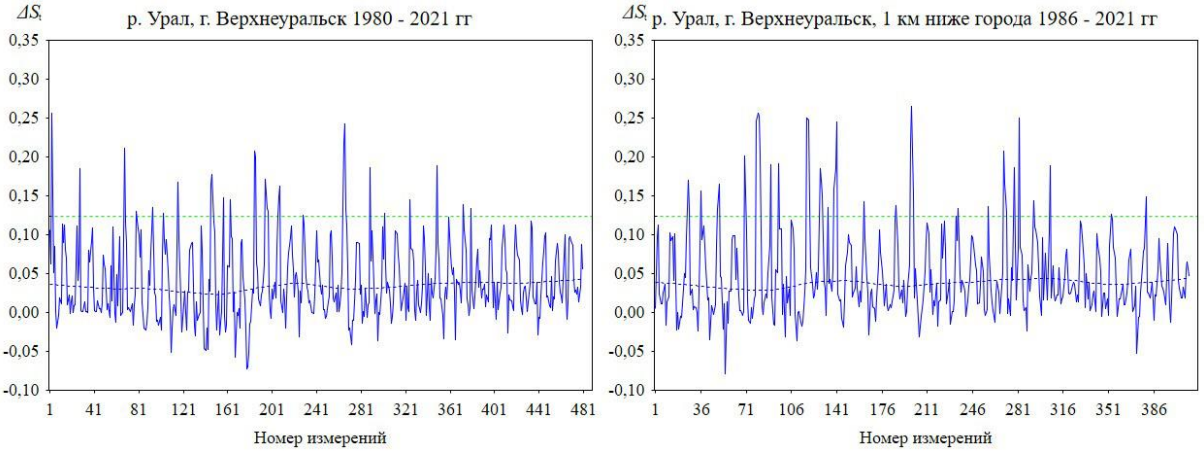


Рис. 1 - Многолетняя динамика энтропийного индекса экосистемы р. Урал в районе г. Верхнеуральск. Синяя штрихлиния – робастная регрессия, зеленая штрихлиния –верхняя граница благополучного состояния

Экологическое состояние р. Урал выше г. Магнитогорск на протяжении всего представленного периода соответствует предельно благополучному: среднее значение энтропийного индекса составляет 0,016 (таблица 2, рис. 2). Отдельные всплески не выходят за пределы благополучного состояния. В то же время нельзя не отметить, что невысокие значения энтропийного индекса обусловлены многочисленными отрицательными значениями, свидетельствующими о концентрациях кислорода, превышающих 100 % насыщение. Что может быть вызвано интенсивным фотосинтезом в период цветения или значительной аэрацией в турбулентной струе. В последнем случае формальная оценка по энтропийному индексу может не вполне корректно отображать состояние экосистемы.

Тем не менее, очевидны различия в динамике энтропийного индекса при сравнении створов, расположенных выше и ниже города (рис. 2). В нижнем створе индекс существенно вариабильней, в особенности до 2002 года, что отражается на значении коэффициента вариации – самом высоком для всего бассейна, 512% (таблица 2). При том, что энтропийный индекс – самый низкий и составляет 0,008. Как и в предыдущем случае это вызвано значительным количеством отрицательных значений.

Примечательно заметное улучшение состояния экосистемы р. Урал ниже города Магнитогорск в последние десятилетия, что отражается на многолетней тенденции к улучшению состояния.

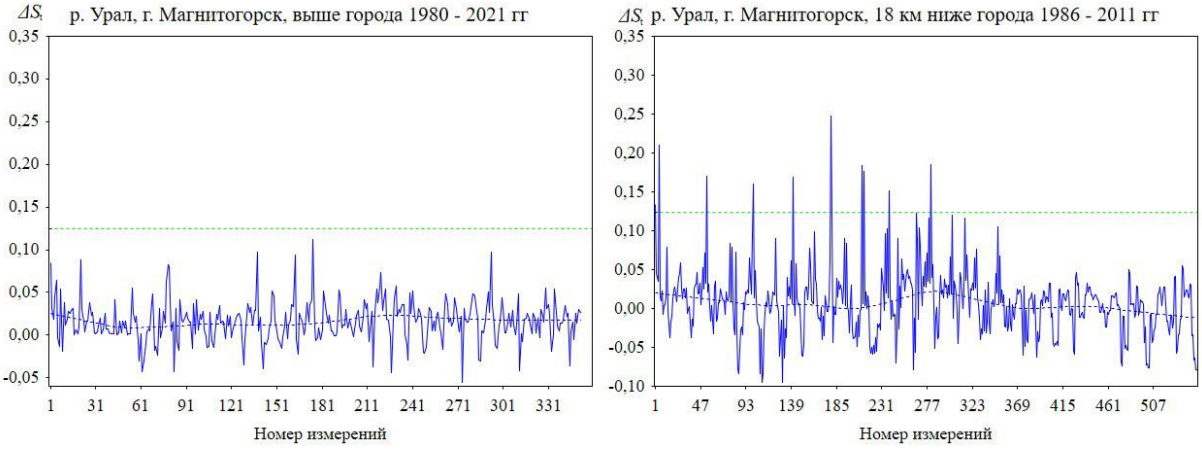


Рис. 2 - Многолетняя динамика энтропийного индекса экосистемы р. Урал в районе г. Магнитогорск (обозначения как на рис 1.)

Состояние экосистемы р. Урал в створе с. Березовка можно характеризовать в среднем за рассматриваемый период как предельно благополучное. Среднее значение энтропийного индекса составляет 0,035, коэффициент вариации – 112% (таблица 2; рис. 3 а).

Экосистемы на участке от створа, расположенного выше г. Орск и нескольких контрольных створах ниже города находятся практически в одинаковом состоянии. К такому заключению можно прийти не только по формальным оценкам – энтропийный индекс составляет от 0,027 до 0,029, коэффициент вариации – от 128% до 137% (таблица 2). Графики динамики энтропийного индекса для всех створов практически идентичны (рис. 3б, 4). Для всех участков отмечается незначительная тенденция к ухудшению состояния.

Ниже по течению, в створах выше г. Оренбург и двух створах ниже г. Оренбург, состояние экосистемы р. Урал не претерпевает значительных изменений (рис. 5). Энтропийный индекс находится в пределах 0,028 – 0,032, близки показатели вариабельности индекса. (таблица 2).

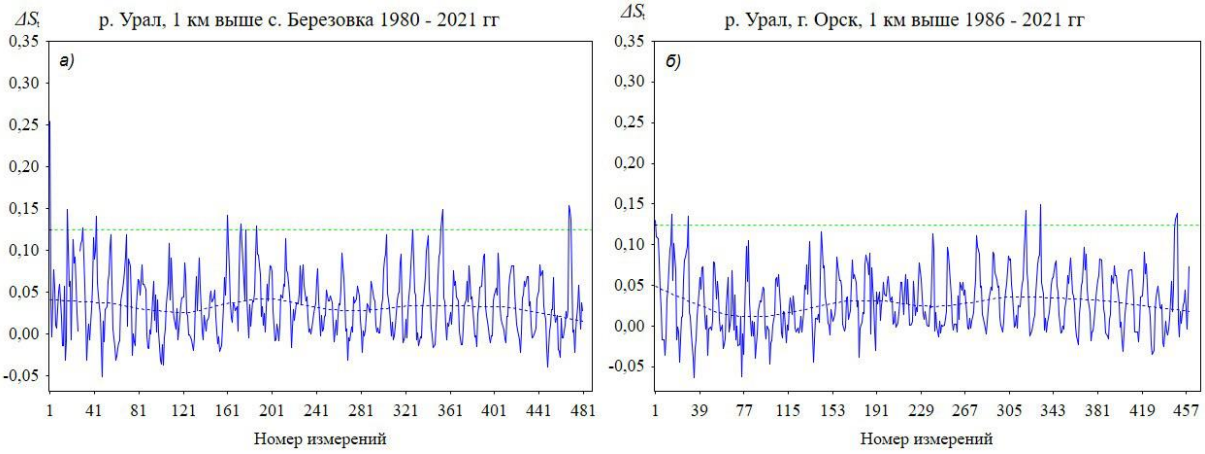


Рис. 3 - Многолетняя динамика энтропийного индекса экосистемы р. Урал в районе а) - п. Березовский; б) - выше г. Орск (обозначения как на рис 1.)

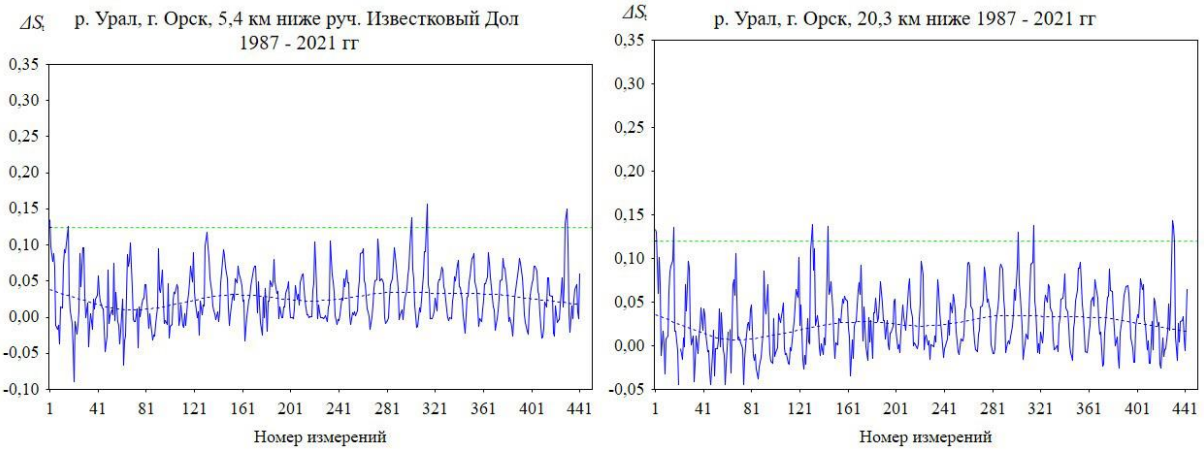


Рис. 4 - Многолетняя динамика энтропийного индекса экосистемы р. Урал в районе г. Орск (обозначения как на рис 1.)

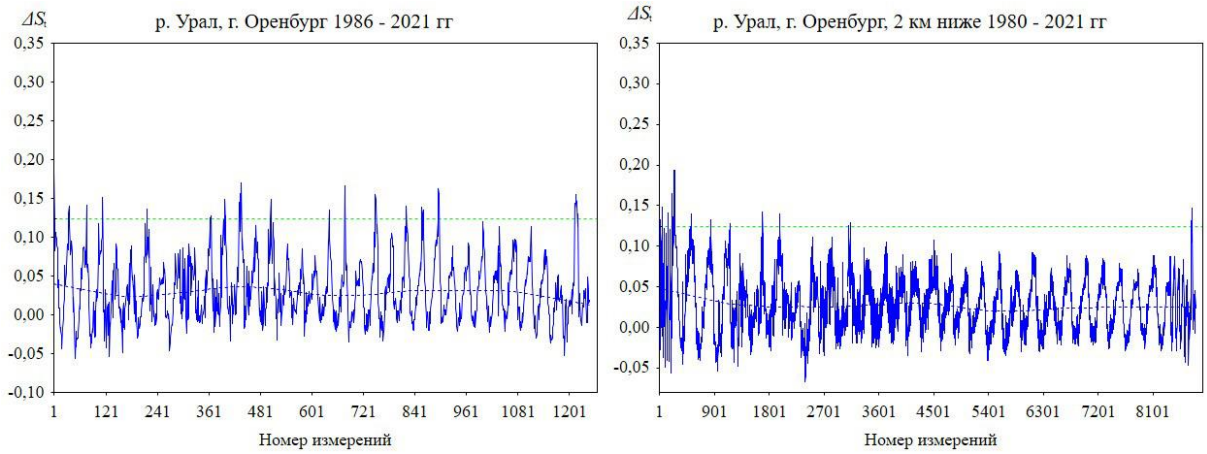


Рис. 5 - Многолетняя динамика энтропийного индекса экосистемы р. Урал в районе г. Оренбург (обозначения как на рис 1.)

Такое же состояние сохраняется вплоть до трансграничного пункта в п. Илек, где среднее состояние экосистемы р. Урал оценивается как предельно благополучное, а сезонные колебания индекса в подавляющем большинстве не превышают значения 0,124, соответствующего благополучному состоянию (таблица 2; рис. 6).

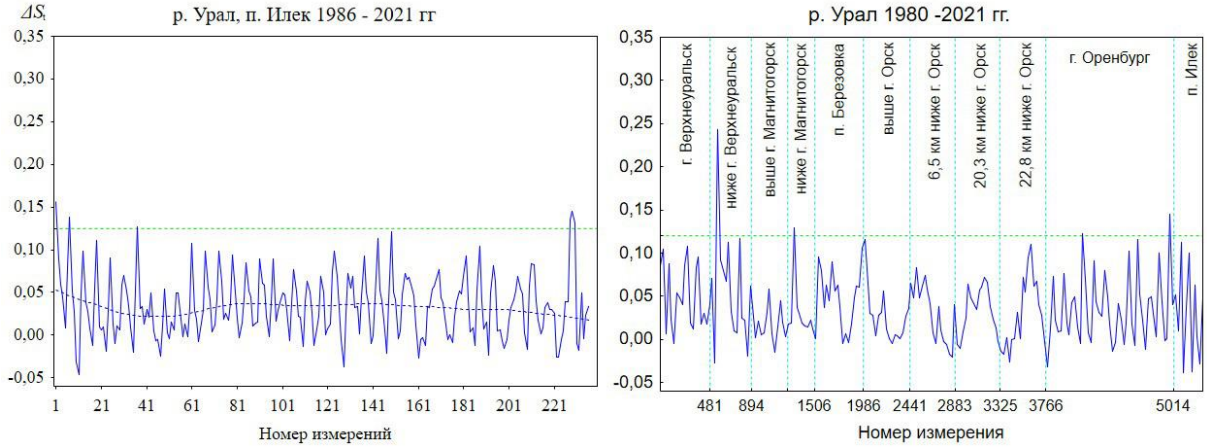


Рис. 6 - Многолетняя динамика энтропийного индекса экосистемы р. Урал в районе п. Илек и среднемноголетняя динамика энтропийного индекса экосистемы р. Урал на всех пунктах наблюдения (обозначения как на рис 1.)

Заключение

В целом по бассейну реки Урал можно сделать следующие выводы. Состояние экосистем, классифицированное по среднемноголетним значениям энтропийного индекса, во всех пунктах наблюдения находится в пределах предельно благополучного. Максимальные значения индекса носят сезонный характер и обусловлены снижением фотосинтетической продукции кислорода при низких температурах. При этом только в отдельных случаях: выше и ниже г. Верхнеуральск, ниже г. Магнитогорск, в черте г. Оренбург, могут достигать уровня удовлетворительного и неблагополучного состояния (рис. 7).

При наличии в бассейне реки Урал значительной хозяйственной деятельности и многочисленных источников загрязнения благополучное состояние водных экосистем может свидетельствовать об их высоком адаптационном потенциале.

Динамика энтропийного индекса во всех случаях соответствовала сезонной цикличности: возрастание значений в холодное время года и снижение в период вегетации при возобновлении активного фотосинтеза.

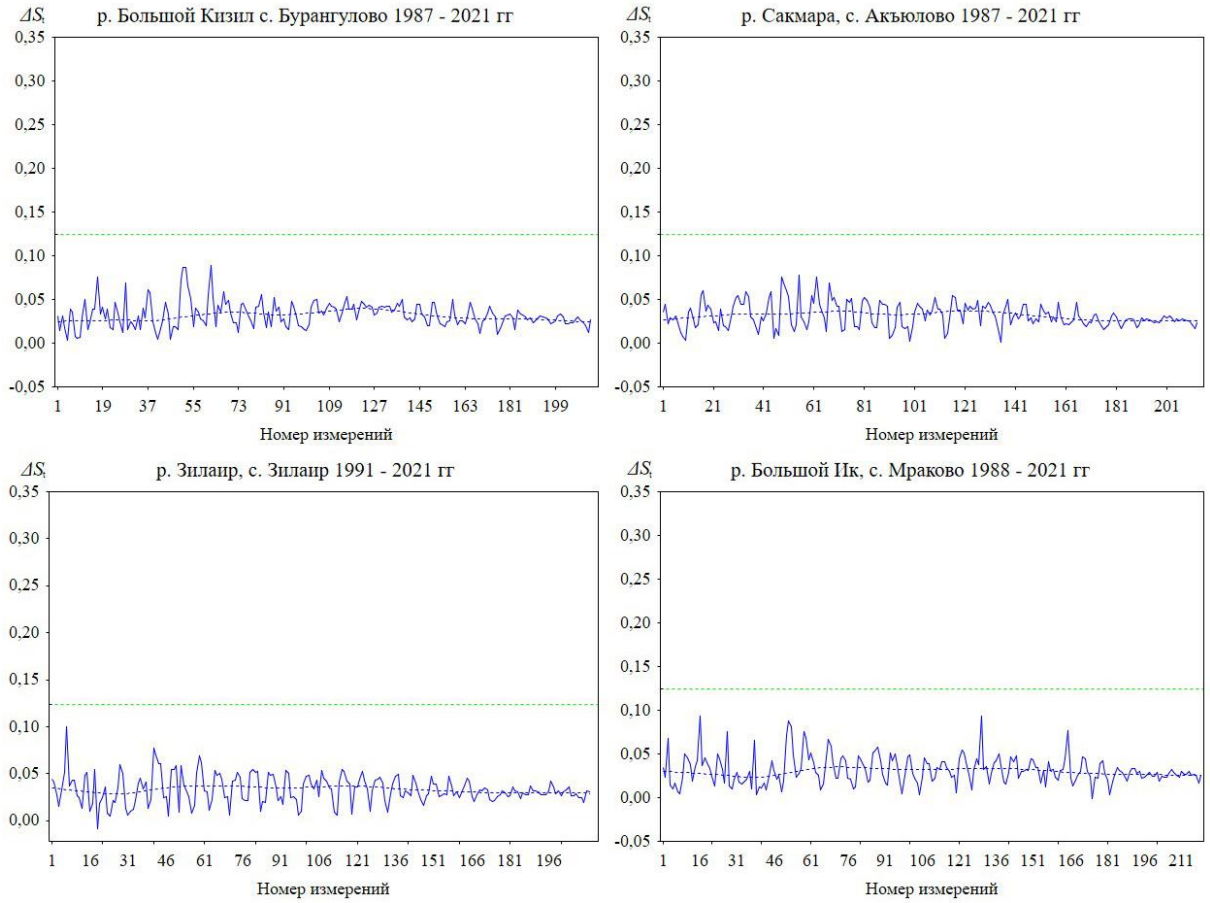


Рис. 7 - Многолетняя динамика энтропийного индекса экосистем притоков р. Урал (обозначения как на рис 1.)

Тем не менее, на фоне близких значений энтропийного индекса для большинства участков, можно выделить более благополучные экосистемы, исходя из степени вариабельности индекса. Иными словами, помимо средних показателей важную информацию о состоянии экосистем содержит динамика энтропийного индекса. Следует также иметь ввиду, что любая формализованная оценка служит средством сравнения состояния экосистем во времени и пространстве, но при этом не отображает абсолютную детальную картину состояния. В этом случае, как минимум рационально установить водный объект или участок водного объекта со сходными природными условиями формирования качества воды и использовать его как фоновую опору оценки. К таким

объектам можно отнести притоки Большой Кизил в с. Бурангулово, Сакмара в с. Акъюлово, Зилаир, Большой Ик в с. Мраково (рис. 8).

Эта закономерность выявлена нами и для других водных объектов России. Для чистых, более благополучных водных объектов характерны более стабильные значения энтропийного индекса. Это важная для оценки состояния водных объектов закономерность свидетельствует о том, что экосистемы, не подверженные антропогенной нагрузке и находящиеся в естественном состоянии, обеспечивают сбалансированное по затратам энергии существование в стационарном режиме. Следует подчеркнуть, что в данном контексте стабильность не означает устойчивость экосистем к внешним воздействиям. В подверженных несвойственной для природного фона нагрузке реках значения энтропийного индекса подвержены существенным колебаниям. Эти особенности могут свидетельствовать о неестественном состоянии водных экосистем загрязненных водных объектов, регулярно реагирующих на негативные внешние воздействия.

Предложенный подход на основе энтропийного индекса дает возможность, используя традиционные гидрохимические показатели, концентрацию растворенного кислорода и температуру воды, решать задачу по интегральной оценке экологического состояния водных объектов. Реализация измерений в автоматизированном режиме с передачей данных по беспроводным каналам связи позволит получать сведения о состоянии водных объектов в режиме реального времени и в случае необходимости принимать своевременные управленческие решения, что особенно важно для трансграничных водных объектов.

Предложенный способ оценки экологического состояния водных объектов может послужить основой для оптимизации системы мониторинга состояния и загрязнения поверхностных вод суши. Оценивая термодинамическое состояние водных экосистем в конкретных физико-химических условиях, тем самым оценивается комплексное воздействие загрязняющих веществ. Энтропийный индекс может являться финальной оценкой экологического состояния водного объекта, если таковое отнесено к разряду благополучного. В случае оценки водных объектов как неблагополучных, может служить основой для принятия решения о более детальных исследованиях. Такой дифференцированный подход к оценке экологического состояния дает возможность сокращения количества наблюдений за загрязняющими веществами в благополучных водных объектах и более детальном исследовании неблагополучных.

Список литературы

1. Правила ведения государственного мониторинга водных объектов и водных ресурсов, от 9 июня 2025 года № 115-НҚ.

2. РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2016. 104 с.

3. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология. Методы системной идентификации. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.

4. Никаноров А.М. Научные основы мониторинга качества вод. СПб.: Гидрометеоиздат. 2005. 576 с.

5. Фрумин Г. Т., Тимофеева Л. А., Трансграничные водные объекты и водосборы России: проблемы и пути решения, Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера», 2014, т. 6, № 2, с. 118 – 133.

6. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1979, 376 с.

7. Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Особенности термодинамики внутриводоемных процессов в пресноводных экосистемах при антропогенном воздействии // Доклады РАН. 2010. т. 433, №2, с. 254 – 256.

8. Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Термодинамика внутриводоемных процессов в пресноводных экосистемах при антропогенном воздействии // Водные ресурсы. 2011. т. 38, № 4, с. 454 – 463.

9.Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Метаболическая мощность экосистем как мера их устойчивости к внешним воздействиям. // Доклады академии наук. 2013. т. 448, № 3, с. 338-341.

10.Трофимчук М.М. О возможности оценки экологического состояния водных объектов на основе энтропии. // Метеорология и гидрология, 2018, № 7, с. 80 – 86.

11. Трофимчук М.М. Энтропийный индекс – новые возможности в оценке экологического состояния водных экосистем. // Метеорология и гидрология, 2020, № 11, с. 46 – 52.

12. Трофимчук М.М. Термодинамическая оценка состояния водных объектов России разных природно-климатических зон и уровней загрязнения. Метеорологияигидрология, 2023, № 5, с. 32 – 40.

13. Кирпичникова Н.В., Трофимчук М.М., Кондакова М.Ю., Романюк О.Л., Фащевская Т.Б. Пространственные и временные изменения качества воды р. Урал по многолетним данным государственной сети мониторинга // Водные ресурсы, 2024. Т. 51. № 5. С. 666-680.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД БАССЕЙНА РЕКИ ЗЕРАВШАН НА ОСНОВЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Абдиева М.Ш., *Садиев Ф.Ф.*
Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем (НИИИВП), г.Ташкент
*e-mail:*matluba_abdiyeva@mail.ru; fsf7711@mail.ru

Аннотация: В статье проведена комплексная оценка качества водных ресурсов бассейна реки Зеравшан на основе гидрохимических показателей. В рамках исследования проанализированы пробы воды, отобранные в 2023-2024 гг. на 14 наблюдательных пунктах в разные сезоны (март, июнь, сентябрь и январь). Рассчитаны комбинаторный индекс загрязнения воды (КИЗВ), удельный комбинаторный индекс загрязнённости воды (УКИЗВ) и количество критических показателей загрязнённости воды (F), на основе которых наблюдательные пункты были классифицированы по классам и категориям качества воды. Результаты показали, что ряд пунктов бассейна, в том числе участки, подверженные воздействию промышленных сбросов и коммунально-бытовой деятельности, относятся к категории «экстремально загрязнённые». В качестве основных загрязняющих веществ выявлены фенол, медь, кадмий и свинец, концентрации которых характеризовались повышенными значениями. Применение комплексного подхода к оценке качества воды имеет важное значение для определения экологического состояния водных объектов, оценки степени загрязнения и разработки мер, направленных на охрану водных ресурсов.

Ключевые слова: Зеравшанский бассейн, гидрохимические показатели, качество воды, комплексная оценка, комбинаторный индекс загрязнения воды (КИЗВ), удельный комбинаторный индекс загрязнённости воды (УКИЗВ), количество критических показателей загрязнённости воды (F).

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF WATER QUALITY IN THE ZERAVSHAN RIVER BASIN BASED ON HYDROCHEMICAL PARAMETERS

Abdieva M.Sh.[1], Sadiev F.F.[1]
[1] Scientific-Research Institute of Irrigation and Water Problems (SRIIWP), Tashkent
e-mail: matluba_abdiyeva@mail.ru; fsf7711@mail.ru

Abstract. The article presents a comprehensive assessment of water quality in the Zeravshan River Basin based on hydrochemical parameters. The study analyzed water samples collected from 14 observation stations during 2023–2024 in different seasons (March, June, September, and January). The Combinatorial Water Pollution Index (CWPI), Specific Combinatorial Water Pollution Index (SCWPI), and the number of critical pollution indicators (F) were calculated, based on which the observation stations were classified by water quality classes and categories. The results showed that a number of stations within the basin, including areas affected by industrial discharges and municipal and domestic wastewater, belong to the category of “extremely polluted.” Phenol, copper, cadmium, and lead were identified as the main pollutants, with elevated concentrations recorded. The application of a comprehensive approach to water quality assessment is of significant importance for determining the ecological condition of water bodies, assessing the degree of pollution, and developing measures aimed at protecting water resources.

Keywords: Zeravshan River Basin, hydrochemical parameters, water quality, comprehensive assessment, Combinatorial Water Pollution Index (CWPI), Specific Combinatorial Water Pollution Index (SCWPI), number of critical pollution indicators (F).

Введение. Зеравшан является трансграничной рекой и имеет стратегическое значение для обеспечения потребностей Самаркандской, Навоийской и Бухарской областей в орошаемом земледелии, промышленности и питьевом водоснабжении. В то же время наличие на территории бассейна предприятий цветной металлургии, химической промышленности и энергетики, а также поступление сточных вод в реку

через ирригационные сети обусловливают существенное изменение качества воды под воздействием антропогенной нагрузки. Это определяет актуальность регулярной оценки гидрохимического состояния вод бассейна с использованием научно обоснованных методов.

Цель исследования - комплексная оценка качества воды на основных наблюдательных пунктах бассейна реки Зеравшан на основе гидрохимических показателей - комбинаторного индекса загрязнения воды (КИЗВ), удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (УКИЗВ) и количества критических показателей загрязнённости воды (F) - и выявление экологически наиболее проблемных участков бассейна.

Материалы и методы. Исследование проведено на основе результатов анализа проб воды, отобранных в 2023-2024 гг. на 14 наблюдательных пунктах, охватывающих участки бассейна с различной степенью антропогенной нагрузки. Отбор проб проводился в рамках сезонных наблюдений в марте, июне, сентябре и январе и включал входной участок реки, ирригационные каналы, коллекторы, а также участки, подверженные воздействию промышленных сбросов.

Для комплексной оценки гидрохимического состояния воды были проанализированы показатели, характеризующие содержание органических загрязняющих веществ - химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода ($БПК_5$), фенолы, нефтепродукты, растворённый кислород (O_2); биогенные компоненты - NH_4^+, NO_2^-, NO_3^- и фосфаты; основные ионы - Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+; минерализация; тяжёлые металлы - Cu, Zn, Cr, Cd и Pb, а также pH, характеризующий кислотно-щелочное состояние водной среды [1].

При комплексной оценке качества воды существующий методический подход был усовершенствован [2] и адаптирован к условиям Узбекистана [1]. В рамках данной методики для оценки качества воды бассейна реки Зеравшан были учтены 22 основных гидрохимических показателя. Концентрации исследуемых компонентов сопоставлялись с нормативными значениями, установленными СанПиН № 0172-06 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод Республики Узбекистан» [3]. Таким образом, оценка гидрохимического состояния водных объектов проводилась с учётом национальных нормативных требований Республики Узбекистан. На основе полученных результатов комплексное состояние качества воды оценивалось по комбинаторному индексу загрязнения воды (КИЗВ), удельному комбинаторному индексу загрязнённости воды (УКИЗВ) и количеству критических показателей загрязнённости (F), после чего

наблюдательные пункты классифицировались по соответствующим классам и уровням качества воды (таблица 1).

Анализ литературы показывает, что гидрохимические индексы широко применяются для комплексной оценки качества воды. В частности, Г.А. Лазарева и П.В. Новикова оценивали качество воды Шлинского водохранилища, С.С. Слажнева, Ю.В. Козырева и М.А. Маурер - реки Чумыш, а А.В. Харламова и П.А. Белова - реки Вуокса на основе комплексных гидрохимических показателей. В указанных исследованиях качество водных объектов в основном оценивалось в пределах 2-4 классов, что свидетельствует об эффективности комплексных индексов как инструмента оценки качества воды и определения степени её загрязнения в различных гидрохимических условиях.

По данным Ш.Т. Искандаровой и соавторов, в воде реки Зеравшан общая минерализация в летний период достигала 1390 мг/л, превышая установленное нормативное значение [4]. В проведённом нами исследовании наибольшая величина общей минерализации была зафиксирована в пункте подземных вод в районе «Навоиазот» и составила 4236,9 мг/л. Данное значение примерно в 3 раза выше максимального показателя, установленного в предыдущем исследовании, что свидетельствует о значительном антропогенном воздействии на минеральный состав воды в данном пункте. Вместе с тем полученный результат указывает на возможное накопление минеральных компонентов в подземных водах, находящихся под воздействием промышленной деятельности, и их влияние на качество воды реки.

Таблица 1 - Комплексная оценка качества водных ресурсов бассейна реки Зеравшан

Водный объект, пункт	Категория качества воды	Основные загрязняющие вещества	КИЗВ	УКИЗВ	Количество критических показателей (F)	Класс и степень качества воды
Река Зеравшан (входной створ)	Загрязнённая	Фенол, медь, кадмий, свинец	89,50	4,06	4	4б
Карасув канал (начальный створ)	Загрязнённая	Медь, хром, кадмий, свинец	99,80	4,50	4	4б
Даргомский канал	Загрязнённая	Медь, хром, кадмий, свинец	90,40	4,10	4	4б
Сиёбский канал	Экстремально загрязнённая	Фенол, медь, кадмий, свинец, фосфаты	136,4	6,2	5	5
Светлый канал	Экстремально загрязнённая	Сульфаты, фенол, медь, хром, кадмий, свинец	113,5	5,1	6	5

Водный объект, пункт	Категория качества воды	Основные загрязняющие вещества	КИЗВ	УКИЗВ	Количество критических показателей (F)	Класс и степень качества воды
Толигулёнский коллектор	Загрязнённая	Фенол, медь, хром, кадмий, свинец	105,6	4,8	4	4б
Хаузаксойский коллектор	Загрязнённая	Медь, хром, кадмий, свинец	98,8	4,49	4	4б
Чиганакский коллектор	Экстремально загрязнённая	Сульфаты, фенол, медь, хром, кадмий, свинец	114,0	5,18	6	5
Каттакурганский отводящий канал	Очень загрязнённая	Медь, хром, кадмий, свинец	107,0	4,9	4	4в
Корадарё (нижний створ)	Очень загрязнённая	Сульфаты, медь, кадмий, свинец	123,0	5,6	4	4в
Сброс сточных вод «Навоиазот»	Экстремально загрязнённая	Хлориды, сульфаты, медь, цинк, хром, кадмий, свинец, магний	166,8	7,5	8	5
Подземные воды в районе «Навоиазот»	Экстремально загрязнённая	Хлориды, сульфаты, медь, цинк, хром, кадмий, свинец, магний	172,3	7,8	8	5
Сброс сточных вод Навоийской ТЭЦ (новый)	Экстремально загрязнённая	Сульфаты, медь, цинк, кадмий, свинец	139,4	6,3	5	5

Наиболее высокий уровень комплексного загрязнения выявлен на участках, подверженных воздействию сбросов предприятия «Навоиазот» и связанных с ним подземных вод. В пункте сброса сточных вод «Навоиазот» КИЗВ составил 166,8, УКИЗВ 7,5, F-8, тогда как в районе подземных вод «Навоиазот» данные показатели достигли 172,3, 7,8 и 8 соответственно. Таким образом, участок подземных вод в районе «Навоиазот» характеризуется максимальным уровнем комплексного загрязнения среди 14 исследованных объектов. Одинаково высокое значение F - 8 на обоих участках указывает на одновременное присутствие значительного числа критических загрязняющих компонентов в формировании качества воды.

На данных участках в качестве основных загрязняющих компонентов выявлены хлориды, сульфаты, медь, цинк, хром, кадмий, свинец и магний. Расширенный спектр загрязняющих веществ в сочетании с высокими значениями F свидетельствует о преобладании многокомпонентного техногенного загрязнения водных объектов.

На сбросе сточных вод Навоийской ТЭЦ (новом) значения КИЗВ, УКИЗВ и F составили соответственно 139,4; 6,3 и 5, в связи с чем качество воды отнесено к 5 классу

«экстремально загрязнённые». На старом сбросе Навоийской ТЭЦ КИЗВ составил 116,8, УКИЗВ - 5,3, F - 5, при этом качество воды оценено как 4г класс «очень грязная». Полученные результаты показывают, что при комплексной оценке качества воды необходимо учитывать не только величины КИЗВ и УКИЗВ, но и количество критических показателей, а также характер их отклонения от нормативных значений.

В исследованиях С.С. Слажневой и соавторов комплексная оценка качества воды проводилась на основе покомпонентного анализа гидрохимических показателей с учётом частоты и кратности превышения их нормативных концентраций. Для воды реки Чумыш значения удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (УКИЗВ) находились в диапазоне 2,91-4,62, при этом качество воды соответствовало 3а–4а классам «загрязнённая» и «грязная» [5]. В то же время, учитывая выраженное антропогенное воздействие на водные ресурсы бассейна реки Зеравшан, результаты нашего исследования показали, что из 14 наблюдательных пунктов качество воды на 6 пунктах соответствовало 5 классу «экстремально загрязнённая», на 2 пунктах - 4в классу «очень грязная», на 1 пункте - 4г классу «очень грязная», и на 5 пунктах - 4б классу «грязная». Таким образом, на 64,3 % исследованных пунктов качество воды соответствовало 4в-5 классам, что позволяет отнести их к участкам с высоким уровнем антропогенной нагрузки.

Анализ частоты выявления основных загрязняющих веществ показал, что наиболее широко распространёнными загрязняющими компонентами в бассейне являются медь, кадмий и свинец: каждый из них выявлен на всех 14 наблюдательных пунктах (100 %). Далее по частоте распространения следуют хром - 9 пунктов (64,3 %), сульфаты - 7 пунктов (50,0 %) и фенолы - 6 пунктов (42,9 %).



Рис. 1 - Распределение значений удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (УКИЗВ) и количества критических показателей загрязнённости (F) на пунктах наблюдений бассейна реки Зеравшан

На рисунке представлена территориальная дифференциация значений УКИЗВ и количества критических показателей (F) по наблюдательным пунктам. Наиболее высокие значения обоих показателей одновременно отмечены на пунктах сброса «Навоиазот» и в районе подземных вод, что свидетельствует о высокой интенсивности комплексного загрязнения и значительном числе критических компонентов на данных участках. Значения УКИЗВ и F по наблюдательным пунктам изменяются в диапазоне 4-8; максимальные значения УКИЗВ составляют 7,5-7,8, а F - 8.

Таким образом, результаты комплексной оценки показывают, что основная проблема качества воды в бассейне реки Зеравшан обусловлена не воздействием отдельного загрязняющего вещества, а совокупным воздействием нескольких токсичных и минеральных компонентов. Особенно участки, находящиеся под воздействием промышленных сбросов и гидрогеологически связанных с ними вод, характеризуются как наиболее экологически неблагополучные территории бассейна.

Заключение

1. В результате комплексной оценки качества воды на 14 наблюдательных пунктах бассейна реки Зеравшан по показателям КИЗВ, УКИЗВ и F установлено, что качество воды на всех исследованных пунктах соответствует 4-5 классам качества.

2. На 6 наблюдательных пунктах качество воды отнесено к 5 классу «экстремально загрязнённая». Наиболее высокий уровень комплексного загрязнения выявлен на пунктах, подверженных воздействию сбросов «Навоиазот» и связанных с ними подземных вод.

3. По частоте выявления загрязняющих компонентов медь, кадмий и свинец занимают доминирующее положение и обнаружены на всех 14 наблюдательных пунктах. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости выделения участков, испытывающих значительное промышленное воздействие, в качестве приоритетных объектов экологического контроля и совершенствования мероприятий по охране водных ресурсов бассейна реки Зеравшан.

Список литературы

1. Абдиева М.Ш. Ер усти сувлари ифлосланиш даражасини гидрокимёвий кўрсаткичлар бўйича комплекс баҳолаш усули. “Renessans Press” нашриёти, 2026. – 38 б.

2. Емельянова, В. П. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям : РД 52.24.643–2002 / В. П. Емельянова, Е. Е. Лобченко. — Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2002. — 54 с.

3. СанПиН № 0172-06. Гигиенические требования к охране поверхностных вод Республики Узбекистан. – Ташкент, 2006. https://nrm.uz

4. Искандарова, И. А. Усманов, М. И. Хасанова // Журнал биомедицины и практики. — 2021. — Т. 6, № 3. — С. 117–125. — DOI: 10.26739/2181-9300-2021-3-18.

5. Слажнева С.С., Козырева Ю.В., Маурер М.А. Оценка качества поверхностных вод (на примере реки Чумыш) // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14, № 2. С. 296–311. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-2-296-311.

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕКСУС-ПОДХОДА

Исаев О.И.
ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, Москва,
e-mail: issaevoleg@mail.ru

Аннотация: в условиях конкуренции отраслей за водные ресурсы изолированное рассмотрение отдельных водопользователей ведёт к неоптимальным решениям, что признаётся как в отечественной, так и в зарубежной практике. Показано, что существующая система диспетчеризации попусков воды на гидроэлектростанциях рассматривает водопотребителей как конкурентов за ограниченный ресурс и не учитывает вторичные межотраслевые связи, существенные для долгосрочного водного баланса. В качестве методологической основы предложен нексус-подход (вода – энергия – продовольствие), при котором указанные ресурсы рассматриваются как единая взаимосвязанная система. Рассмотрены WEF-индекс для количественной оценки взаимосвязи между секторами и метод TOPSIS для ранжирования сценариев водораспределения. Обосновано, что экономическое планирование в рамках нексус-подхода должно включать оценку альтернативных издержек и долгосрочных последствий, что позволяет формировать сбалансированные режимы использования водных ресурсов.

Ключевые слова: водные ресурсы, нексус-подход, водно-энергетический баланс, водораспределение, WEF-индекс, метод TOPSIS, многокритериальная оптимизация, устойчивое развитие.

ECONOMIC PLANNING OF WATER ALLOCATION BASED ON THE NEXUS APPROACH

Isaev O.I.
All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow
e-mail: issaevoleg@mail.ru

Abstract: In the context of intersectoral competition for water resources, isolated consideration of individual water users leads to suboptimal solutions, which is recognized in both domestic and international practice. It is shown that the existing system of water release dispatching at hydropower plants treats water users as competitors for a limited resource and does not account for secondary intersectoral linkages that are significant for the long-term water balance. The nexus approach (water – energy – food) is proposed as a methodological framework, in which these resources are treated as a single interconnected system. The WEF index for quantitative assessment of intersectoral linkages and the TOPSIS method for ranking water allocation scenarios are examined. It is argued that economic planning within the nexus approach should include the assessment of opportunity costs and long-term consequences, which enables the formation of balanced water resource use regimes.

Keywords: water resources, nexus approach, water-energy balance, water allocation, WEF index, TOPSIS method, multi-criteria optimization, sustainable development.

В условиях конкуренции экономических агентов и целых отраслей за водные ресурсы изолированное рассмотрение отдельного водопользователя (или соответствующей отрасли в целом), как правило, ведет к выводам о целесообразности

максимального удовлетворения (одновременно по объему и режиму) его потребностей. При определённых допущениях, увеличение уровня воды в соответствующем водохранилище приводит к увеличению сброса воды через турбины и, соответственно, росту выработки электроэнергии гидроэлектростанциями [1]; обеспечение оптимального режима орошения ведет к увеличению урожайности [2]; регулирование уровней воды в интересах рыбного хозяйства естественно положительно влияет на вылов рыбных ресурсов [3]. Подобный «изолированный» подход, который игнорирует взаимное влияние потребителей, экологические и социальные ограничения, долгосрочные последствия для источника, не учитывает системные эффекты и, в условиях дефицита водных ресурсов, ведёт к неоптимальным решениям, считается ошибочным как в нашей стране, так подвергается критике и за рубежом [4].

Балансировка интересов водопотребителей сопряжена с объективным конфликтом интересов. Для гидроэнергетики критически важно поддерживать высокий уровень водохранилища и стабильный напор, обеспечивая при этом возможность повышенных пропусков воды через турбины в часы пиковой нагрузки энергосистемы. В годовом разрезе оптимальным является режим, предусматривающий накопление водных ресурсов в паводковый период и их расходование в меженный (маловодный) период. В то же время сельское хозяйство нуждается в гарантированной подаче воды в строго определённые сроки, синхронизированные с посевными и поливными графиками. Для большинства сельскохозяйственных культур определяющее значение имеют как объёмы водоподачи, так и точные даты поливов, привязанные к вегетационным циклам. Резкие колебания расходов в реке способны нарушить работу оросительных систем и привести к снижению урожайности. Для рыбоводства важны специальные попуски воды и плавный режим изменения уровня [5].

В современных условиях процесс диспетчеризации попусков воды на гидроэлектростанциях представляет собой многоуровневую систему управления, ориентированную на достижения сбалансированного учёта разнонаправленных интересов водопользователей: сельского хозяйства, энергетики, рыбохозяйственного сектора, транспорта, водоснабжения населения и предприятий. Базовым элементом данного процесса выступает комплексный сбор и обработка разнородных данных, включающих гидрологические прогнозы приточности, метеорологические параметры, сведения о биологических циклах ключевых видов ихтиофауны, а также оперативные заявки отраслевых потребителей водных ресурсов. На основе собранной информации с применением специализированных информационно-аналитических систем осуществляется формирование сценариев регулирования, обеспечивающих

моделирование водно-энергетических режимов в различных временных горизонтах – от долгосрочного планирования до оперативного управления. При этом нормативно закреплённые диспетчерские графики и правила использования водохранилищ изначально предусматривают механизмы компромиссного распределения водных ресурсов: к числу таковых относятся, например, регламентированные «рыбохозяйственные полки», предполагающие поддержание стабильного повышенного сброса воды в целях затопления нерестилищ, а также установление минимально допустимых расходов в нижнем бьефе для сохранения благоприятных условий обитания водных биоресурсов. Существенное значение в системе управления отводится межведомственному взаимодействию: координационные рабочие группы (с участием представителей Росрыболовства, Росводресурсов, системного оператора энергосистемы и иных профильных ведомств), обеспечивают актуализацию режимов регулирования с учётом динамично изменяющейся гидрологической и социально-экономической обстановки. В рамках оперативного управления осуществляется непрерывный мониторинг параметров водного режима в реальном времени, позволяющий своевременно выявлять отклонения (в том числе обусловленные аномальными гидрологическими явлениями либо резкими колебаниями энергопотребления) и вносить коррективы в режимы работы гидроузлов с целью минимизации межотраслевых конфликтов. Тем не менее, существующая система управления рассматривает разных водопотребителей как конкурентов за недостаточный ресурс – воду, и пытается балансировать интересы разных водопользователей исходя из целей минимизации совокупного ущерба. Вторичные взаимосвязи отраслей остаются за рамками управления.

Однако вторичные связи водопользователей оказывают существенное влияние на межотраслевой водный баланс в долгосрочной перспективе. Ярким примером выступает рапс, из которого делают биотопливо: в данном случае продукт сельского хозяйства уже может быть измерен в энергетических характеристиках. Другой пример, сельскохозяйственная техника и переработка, которые также требует энергии, т.е. упрощенно – чем больше валовое производство аграрной продукции, тем больше спрос на электроэнергию, производимую ГЭС. Недавний проект Китая «Великая солнечная стена» (Kubuqi Desert Ordos Central-Northern New Energy Base) по строительству солнечных электростанций по северной границе пустыни Кубучи также иллюстрирует не прямые связи между энергетикой и водными ресурсами. Строительство направлено на достижение двух целей одновременно – генерирование электроэнергии и борьба с опустыниванием, так как благодаря тени от оборудования снижается температура почвы под панелями, где высажены засухоустойчивые растения, уменьшается испарение

грунтовых вод и ослабляется интенсивность ветрового воздействия – это помогает закреплять пески, и в результате способствует борьбе с опустыниванием.

Эффективной методологической основой для развития сбалансированного интегрированного управления водными ресурсами может служить нексус-подход (от лат. nexus – «связь», «сцепление»), при котором водные ресурсы, электроэнергия (не только вырабатываемая на гидроэлектростанциях) и продовольствие рассматриваются комплексно, как единая взаимосвязанная система, где решения в одной сфере неизбежно влияют на другие. Здоровье населения, землепользование, состояние экосистем и другие факторы также должны быть приняты во внимание [6]. В зарубежной научной литературе для комплексной оценки взаимосвязи и взаимозависимости между водными, энергетическими и продовольственными системами предлагается WEF индекс (вода-энергия-продовольствие), который измеряется по шкале от 0 до 100 баллов [7].

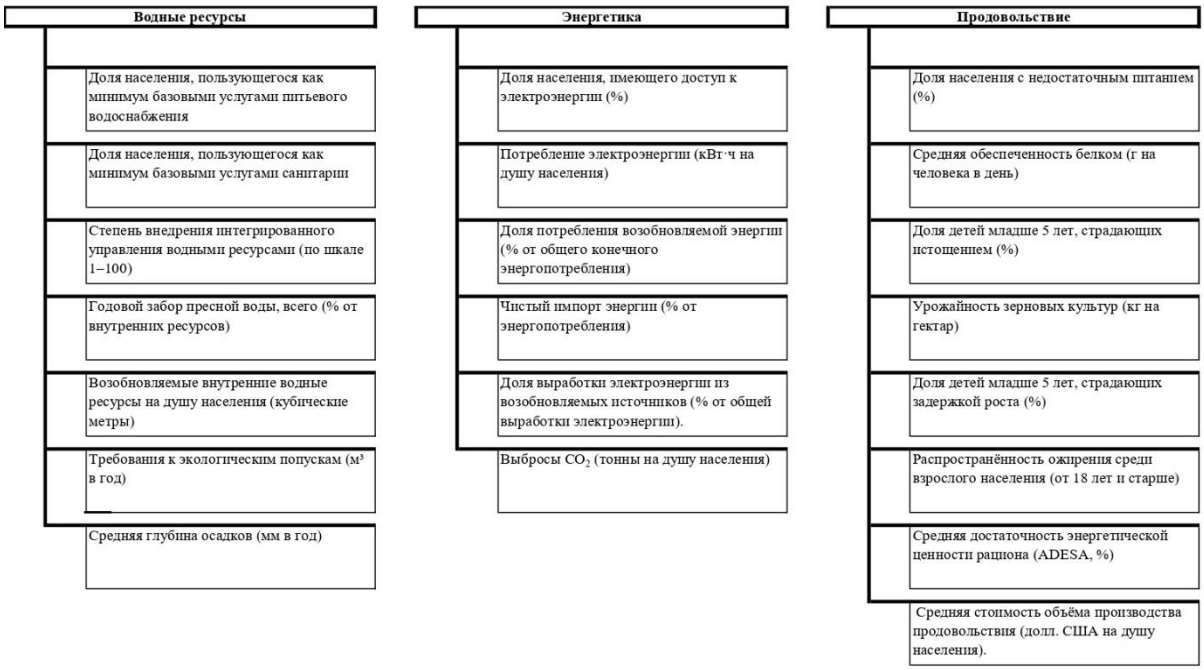


Рис. 1 - Параметры WEF индекса, составлено автором по [7]

Лишь часть параметров WEF индекса имеют экономический характер и могут быть оценены в финансовых параметрах: средняя стоимость объема производства продовольствия, чистый импорт энергии, урожайность зерновых культур. При этом остальные параметры, хотя и не выражаются напрямую в денежных единицах, опосредованно оказывают существенное влияние на ВВП страны.

Для расчета WEF индекса используется композитный индекс [8]:

$$N_{WEF} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} w_i \cdot I_{i,norm} \quad (1)$$

где I - нормировка индикатора к безразмерному виду (0–1), рассчитанная по формуле:

$$I_{norm} = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (2);$$

W_j – вес индикатора;

N = 21 для полного набора WEF индекса (существуют подходы с большим количеством параметров).

Для более детального анализа можно использовать многокритериальные методы, которые позволяют учитывать приоритеты (дефицит воды, энергозатраты, продовольственная безопасность) и дают количественную оценку сценариев водораспределения в рамках нексуса-подхода. Например, метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) – это метод многокритериального принятия решений, который ранжирует альтернативы по степени близости к «идеальному решению» и удалённости от «наихудшего решения». Метод может быть использован, когда нужно сравнить сценарии (например, варианты водораспределения или режимы работы водохранилищ) по разнородным критериям: объём воды, затраты, экологические эффекты, вклад в продовольственную безопасность и т. п.

Алгоритм расчета методом TOPSIS представлен на рис. 2.

При формировании матрицы решений в строки вносятся альтернативы (например, сценарии водораспределения), в столбцы - критерии (объём водоподачи, стоимость, снижение дефицита, влияние на урожайность и др.). Чтобы критерии с разными единицами измерения были сопоставимы необходимо нормировать матрицу по формуле 2. При необходимости учитываются веса критериев (на этом этапе целесообразно применение экспертной оценки). При определении положительного идеального решения (PIS) и отрицательного идеального решения (NIS) необходимо учитывать, что для «полезных» критериев (чем больше, тем лучше) максимум – это PIS, минимум – NIS, а для «затратных» (чем меньше, тем лучше) наоборот. Расчет расстояния до PIS и NIS для каждой альтернативы:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^+)^2},\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (3)$$

где v_j^+ и v_j^- - значения PIS и NIS по j-му критерию.

Коэффициент относительной близости к идеальному решению:

$$C_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (4)$$

C_i^* лежит в диапазоне $[0; 1]$: чем ближе к 1, тем предпочтительнее альтернатива.

Далее необходимо ранжировать альтернативы по убыванию C_i^*.

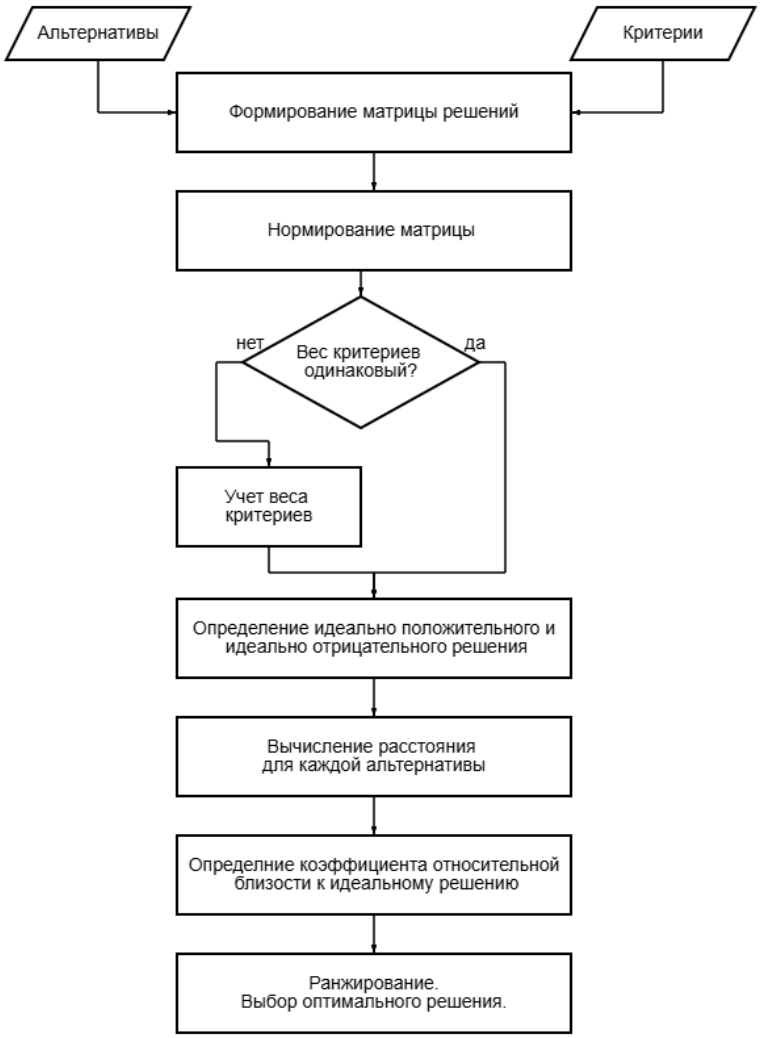


Рис. 2 - Алгоритм выбора оптимального решение методом TOPSIS, составлено автором по материалам [9, 10]

Лучшая альтернатива распределения ресурсов одновременно и максимально близка к PIS (вектор, где каждый критерий принимает своё наилучшее возможное значение) и максимально удалена от NIS (вектор с наихудшими значениями по каждому критерию). Близость оценивают через евклидовы расстояния в многомерном пространстве критериев. Итоговый рейтинг даёт коэффициент относительной близости к идеалу.

WEF индекс (точнее его динамика) помогает проводить комплексное планирование и принимать решения с учётом взаимодействия разных секторов, выявлять возможности для повышения эффективности использования ресурсов, оптимизировать потребление воды и энергии, разрабатывать (и корректировать) эффективную политику и нормативные акты для устойчивого управления ресурсами, оценивать риски, связанные с климатом, и уязвимость в системе, повышать устойчивость и адаптивность систем к изменениям. Индекс позволяет оценить, насколько эффективно регион управляет своими

ключевыми ресурсами, и найти точки для улучшения в системе «вода – энергия – продовольствие».

Концептуально связь водных ресурсов, энергии и продовольствия в контексте обеспечения устойчивости экосистем (и биосферы в целом), а также современных вызовов, таких как растущая урбанизация, глобализация мировой экономики и изменения климата, с учетом целей устойчивого развития, а именно – укрепление борьбы с бедностью и развитие «зелёной» экономики можно схематично представить в следующем виде (рис. 3).

Нексус подход предлагает интегрированную методологию для анализа и оптимизации этих взаимосвязей, позволяя учитывать компромиссы и синергию между секторами. Общепринято, что выращивание сельскохозяйственных культур невозможно без воды; забор, подготовка и перераспределение водных ресурсов требуют затрат энергии; а гидрогенерация опирается на использование водных объектов. При этом, энергетические затраты, в том числе через внесение удобрений, обработку почвы, сбор урожая, логистику, орошение и переработку влияют на объёмы доступного продовольствия.

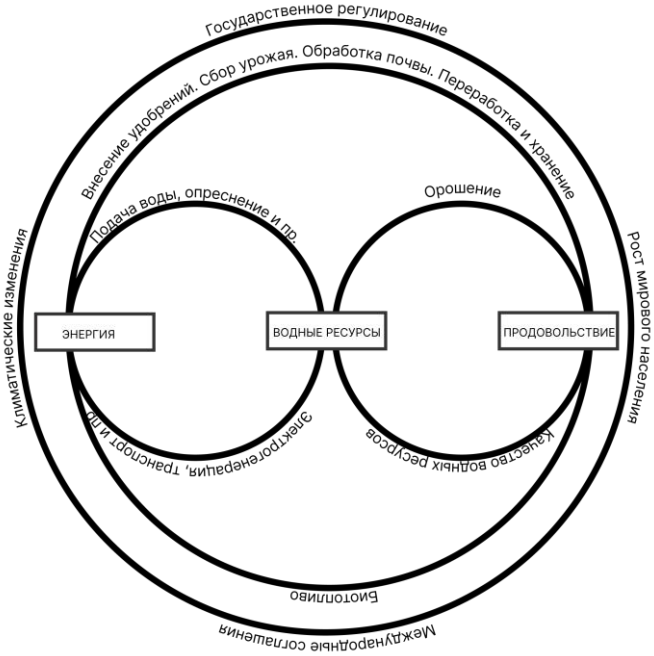


Рис.3 - Концептуальная схема взаимовлияния энергии, водных ресурсов и продовольствия

Ключевые принципы нексус-подхода: отказ от изолированного управления в пользу согласованных решений; анализ взаимосвязей, т.е. выявление положительных (синергия) и отрицательных (компромиссы) эффектов; поиск компромиссов – минимизация конфликтов между секторами при максимизации общей выгоды;

вовлечение заинтересованных сторон – участие государства, бизнеса, науки и гражданского общества; учёт долгосрочных последствий.

Применение нексус-подхода позволяет:

1) комплексно анализировать взаимосвязи и потенциальные конфликты между секторами;

2) выявлять синергетические эффекты – например, внедрение водосберегающих агротехнологий освобождает ресурсы для энергетики и питьевого водоснабжения;

3) оптимизировать режимы работы гидротехнических сооружений с учётом многоцелевого использования водных ресурсов;

4) вовлекать в процесс принятия решений все заинтересованные стороны – от представителей сельского хозяйства и энергетики до экологических организаций и местных сообществ.

Нексус подход, как отмечалось, рассматривает воду, энергию, продовольствие и экосистемы как единую взаимосвязанную систему, где решения в одном секторе влияют на другие. Взаимосвязи между секторами в рамках нексус-подхода носят системный и зачастую конфликтный характер, формируя сложную сеть взаимных зависимостей. Так, сектор энергетики тесно сопряжён с водопользованием: гидроэнергетика предъявляет значительные требования к объёмам и режимам стока, что нередко вступает в противоречие с нуждами сельского и рыбного хозяйства, а также с обеспечением бытовых потребностей населения; при этом тепловые электростанции задействуют большие объёмы воды для охлаждения, а процессы добычи ископаемого топлива – угля, нефти и газа – способны провоцировать загрязнение водных объектов, тем самым косвенно ограничивая возможности их дальнейшего использования в иных отраслях. Еще более выражена связь водных ресурсов и продовольственного сектора: орошаемое земледелие остаётся крупнейшим потребителем пресной воды, на долю которого, по разным оценкам, приходится до 70 % [11] мирового водопотребления, и расширение орошаемых площадей закономерно ведёт к сокращению речного стока, оказывая влияние на потенциал гидроэнергетики и состояние водных экосистем. Параллельно прослеживается и обратная зависимость – между энергетикой и продовольствием: производство минеральных удобрений, функционирование дождевальной и иной техники, и работа перерабатывающих мощностей напрямую зависят от надёжного снабжения энергоресурсами, тогда как внедрение энергоэффективных решений в аграрном секторе способно снижать не только энергозатраты, но и косвенное давление на водные ресурсы за счёт оптимизации технологических процессов.

При этом все перечисленные сектора неразрывно связаны с состоянием экосистем: сохранение биоразнообразия и поддержание качества воды выступают базовыми условиями устойчивости всей системы, поскольку деградация или истощение водных ресурсов неизбежно отражается на продовольственной безопасности и ограничивает возможности энергетического сектора, формируя каскадные эффекты, которые необходимо учитывать в том числе при экономическом планировании водораспределения. Кроме того, потенциальное увеличение площади орошаемых земель в начале ведёт к росту производства сельскохозяйственной продукции, а уже в среднесрочной перспективе, при избыточных или недостаточных поливах может повлечь снижение урожайности из-за заболачивания или развития вторичного засоления [12]. То есть взаимовлияние секторов не только многофакторное, но и меняется во времени.

При планировании водораспределения в целях орошения требуется учитывать не только норму полива, но и экономическую ценность каждой дополнительной единицы воды с точки зрения прироста урожайности, а также её альтернативную стоимость для энергетики и водоснабжения. Такой анализ помогает обоснованно распределять ресурсы и избегать ситуаций, когда локальная экономия в одном секторе приводит к существенным потерям в другом, в том числе убыткам будущих периодов.

Упрощенно, при сопоставлении эффектов в различных секторах (сельское хозяйство, энергетика, водоснабжение) удельная экономическая эффективность водопользования (руб./м³) может быть описано формулой [13]:

$$E_{\text{уд}} = \frac{\text{Совокупный прирост выручки или снижение ущерба}}{V_B}$$

Этот показатель удобно использовать в нексус-анализе, чтобы сопоставлять эффекты в секторах (сельское хозяйство, энергетика, водоснабжение).

На практике реализация нексус-подхода опирается на сочетание нормативно-правовых механизмов, экономических инструментов и информационно-аналитических систем. В качестве базовых ограничений для экономического моделирования должны быть приняты существующие компромиссные режимы (рыбохозяйственные полки, санитарные попуски и др.), закрепленные правилами использования водных ресурсов. В свою очередь, экономические модели позволяют ранжировать сценарии водораспределения по критериям эффективности и устойчивости: учитывается не только прямой доход сектора (выручка от продажи электроэнергии, сельхозпродукции), но и косвенные эффекты – снижение ущерба от паводков, сохранение рыбных запасов, поддержание качества воды. Игнорирование межсекторальных эффектов приводит к недооценке ценности воды в сельском хозяйстве

и переоценке её роли в энергетике, что в итоге формирует неоптимальные режимы регулирования [14].

В условиях нарастающего дефицита воды и усиления конкуренции за ресурс нексус-подход анализирует, как отрасли влияют друг на друга, и помогает искать решения, которые дают синергию, либо позволяют грамотно управлять компромиссами. Соответственно, экономическое планирование в рамках нексуса выходит за рамки простого нормирования объёмов и включает оценку альтернативных издержек, внешних эффектов и долгосрочных последствий управленческих решений. Экономическое планирование водораспределения в рамках нексус-подхода представляет собой комплексную систему, объединяющую нормативно-правовые рамки, экономико-математические модели, цифровые инструменты и институциональные механизмы координации. Его ценность состоит в способности учитывать не только прямые экономические эффекты, но и межсекторальные связи, неопределённость и долгосрочные последствия управленческих решений. Подход позволяет формировать сбалансированные режимы использования водных ресурсов, обеспечивающие устойчивое развитие взаимосвязанных секторов экономики.

Список литературы

1. Оценка энергетической эффективности функционирования водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов в начале XXI столетия / С. В. Ясинский, И. С. Соболь, Д. Н. Хохлов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 6. – С. 835-846. – DOI 10.31857/S2587556623060146. – EDN APSVIX.

2. Голованов А. И. Мелиорация земель : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки (специальности) «Природообустройство и водопользование» / под ред. А. И. Голованова ; Ассоц. «Агрообразование». – Москва : КолосС, 2011. –823, с. : ил.,табл – ISBN 978-5-9532-0752-2

3. Минина, Л. М. Особенности уровенного режима Горьковского и Чебоксарского водохранилищ в весеннее-летний период и их влияние на нерест рыб / Л. М. Минина, А. Е. Минин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 3. – С. 46-61. – DOI 10.35567/19994508_2022_3_4. – EDN QRTLXY.

4. Al-Zu’bi, M., & Keough, N. (2018). Water, Energy and Food: The Problematic Aspects of the Transition from ‘Silo Approach’ to ‘Nexus Approach’ in the Arab Region. In L. A. Swatuk & C. Cash (Eds.), *Water, Energy, Food and People Across the Global South* (pp. 23–42). Springer Nature.

5. Концептуальные подходы к созданию геоинформационных веб-систем для обоснования решений по развитию мелиоративно-водохозяйственного комплекса / Э. Б. Дедова, С. Д. Исаева, А. В. Матвеев, Р. М. Шабанов // Природообустройство. – 2024. – № 2. – С. 6-12. – DOI 10.26897/1997-6011-2024-2-6-12. – EDN WUOQPI.

6. Сдасюк, Г. В. Водный кризис Индии: нексусно-региональная концепция решения / Г. В. Сдасюк, Н. Н. Алексеева // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 3. – С. 420-429. – DOI 10.31857/S2587556623030093. – EDN QSPVSU.

7. WEF Nexus Index Tool. - URL: https://www.water-energy-food.org/resources/tool-wef-nexus-index (дата обращения: 15.08.2026).

8. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. – Paris : OECD Publishing, 2008. – 158 p. – ISBN 978-92-64-04345-9. DOI: 10.1787/9789264043466-en.

9. Сеидова, И. Применение метода TOPSIS для принятия решений / И. Сеидова, Л. Мамедова // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metoda-topsis-dlya-prinyatiya-resheniy?ysclid=mt087884f746083692 (дата обращения 12.08.2026). Hwang, C.-L. Multiple Attribute Decision Making: Methods and

10. Applications / C.-L. Hwang, K. Yoon. – Berlin : Springer-Verlag, 1981. – 269 p. – ISBN 978-3-540-10558-5.

11. UN-Water. The United Nations World Water Development Report 2024:Water for Prosperity and Peace. – Paris : UNESCO, 2024. – 153 p. – DOI: 10.18356/9789213589113.

12. Исаев, О. И. Повышение эффективности управления водным хозяйством на основе совершенствования экономической оценки водных ресурсов / О. И. Исаев // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства : Сборник тезисов докладов VII Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 22 мая 2024 года. – Москва: Издательство: Ясинский С. В., Соболь И. С., Хохлов Д. Н. и др. Оценка энергетической эффективности функционирования водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов в начале XXI столетия // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 847–862. МИСИ-МГСУ, 2024. – С. 110-111. – EDN VQPYCK.

13. Progress on Water-Use Efficiency 2018: Baseline for SDG Indicator 6.4.1. – Rome: FAO, 2018. – 72 p.

14. Оценка энергетической эффективности функционирования водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов в начале XXI столетия / С. В. Ясинский, И. С. Соболь, Д. Н. Хохлов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 6. – С. 835-846. – DOI 10.31857/S2587556623060146. – EDN APSVIX.

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТАВА И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ ВЕРХНЕГО ДОНА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Даниленко А.О., *Коваленко А.А., Коваленко Д.Е.*
Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону
E-mail: a.danilenko@gidrohim.mecom.ru

Аннотация: В период с 2010 по 2025 гг. в бассейне Верхнего Дона наблюдаются региональные тенденции изменчивости химического состава поверхностных вод, которые проявляются в снижении среднегодовых концентраций сульфатов, увеличении среднегодовых концентраций гидрокарбонатов, кальция и минерализации воды, при этом вниз по течению интенсивность многолетней изменчивости ионного состава воды снижается. Наблюдаемые тенденции могут быть последствием как добычи бурого угля с повышенным содержанием серы в верховьях Дона, так и изменений гидрологического режима рек под действием климатических факторов (смена приоритетности типа питания со снегового на смешанное). Трансформация ионного состава оказывает менее значительное влияние на изменчивость значений водородного показателя, чем отмечаемое тут накопление органических веществ, так как многолетняя динамика снижения среднегодовых значений pH лучше коррелирует с динамикой увеличения среднегодовых значений ХПК, чем с динамикой главных ионов.

Ключевые слова: Верхний Дон, химический состав поверхностных вод, многолетняя изменчивость, климатические изменения, антропогенное влияние.

LONG-TERM TRENDS OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF SURFACE WATERS IN THE UPPER DON RIVER BASIN UNDER MODERN CLIMATIC CHANGE

Danilenko A.O., Kovalenko A.A., Kovalenko D.E.
Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don
E-mail: a.danilenko@gidrohim.mecom.ru

Abstract: Between 2010 and 2025, the Upper Don basin exhibited regional trends in the variability of the chemical composition of surface waters. These trends manifested as a decrease in average annual sulfate concentrations and an increase in average annual concentrations of bicarbonates, calcium, and water mineralization, while the intensity of long-term variability in ionic composition downstream decreased. The observed patterns may result from both brown coal mining with elevated sulfur content in the headwaters of the Don and alterations in river hydrological regimes driven by climatic factors (specifically, a shift in predominant recharge type from snowmelt to mixed sources). The transformation of ionic composition exerts a less significant influence on pH value variability than the documented accumulation of organic matter. This is evidenced by the fact that the multi-annual dynamics of decreasing average annual pH values correlate more strongly with the dynamics of increasing average annual COD than with the dynamics of major ions.

Key words: Upper Don, chemical composition of surface waters, long-term variability, climatic changes, anthropogenic impact

Введение

Дон берёт свое начало на северной окраине Среднерусской возвышенности, протекает на протяжении 1870 км и впадает в Таганрогский залив Азовского моря [1]. Верхний Дон от истока до г. Лиски имеет протяженность 470 км при общем уклоне 0,0002 и площади водосбора 70 тыс. км^2 (16,7 % от общего). Замыкающий створ на р. Дон ниже г. Лиски принят для целей данного исследования за разделительную границу Верхнего и Среднего Дона, так как при таком делении сохраняется единство физико-географических условий формирования речного стока (большая часть бассейна Верхнего Дона располагается в лесостепной природной зоне).

Вплоть до начала 2000-х гг. основным источником питания рек бассейна Верхнего Дона были талые снеговые воды. Согласно [2], доля весеннего стока (III-VI) составляла от 70 до 90 %, летне-осеннего (VII-XI) и зимнего (XII-II) периодов – 10-30 %. Однако исследования [3-5] показывают, что в современных климатических условиях в бассейне Верхнего Дона сформировались новые особенности водного режима рек: уменьшение объёмов снегового половодья и сокращение до 35–45 % доли стока весеннего половодья в годовом объёме в правобережных притоках Дона, снижение максимумов весеннего половодья в 2–3 раза, увеличение общей продолжительности половодья на 15–20 суток, зимние оттепели. В связи с уменьшением роли талого снега в питании рек происходит смена приоритетности типа питания с преобладающего снегового на смешанное для рек Среднерусской возвышенности [6].

Верхнее течение р. Дон преимущественно расположено в пределах лесостепной зоны оподзоленных, выщелоченных и типичных чернозёмов [2] со сравнительно неглубоким залеганием карбонатного горизонта. Такие чернозёмы широко используются для производства зерна и нуждаются во внесении фосфорных и калийных удобрений [1]. В пределах бассейна Верхнего Дона обширно представлены известняковые карсты, обладающие большой поглощающей способностью. Массы талых и дождевых вод, поглощенные «прожорами», накапливаются в толщах известняков и образуют местные обильные водоносные горизонты, выклинивающиеся в речных долинах и питающие реки в межень [2].

На качество поверхностных вод в бассейне Верхнего Дона также влияют антропогенные источники загрязнения: промышленные, агропромышленные и городские сточные воды, неорганизованные стоки с промышленных площадок, территорий населённых пунктов, сельскохозяйственных угодий и др. Производственное водоснабжение базируется, в основном, на использовании воды поверхностных источников [1]. Так, например, вода в верховьях р. Дон на территории Тульской области в створах у г. Донской много лет остаётся стабильно «грязной» [7].

Совокупность прямых и косвенных факторов формирования химического состава природных вод в бассейне Верхнего Дона формирует характерные черты гидрохимического режима образующих его водотоков. Однако актуальные исследования [3-6] отмечают нестационарность основных факторов, влияющих на химический состав поверхностных вод, в особенности гидрометеорологических условий, что может приводить к формированию тенденций изменчивости гидрохимического режима рек в бассейне Верхнего Дона. Результаты оценки

статистической значимости таких тенденций, их направленности и скорости изменений представлены в данной работе.

Материалы и методы

Для характеристики тенденций изменчивости химического состава рек бассейна Верхнего Дона использована ретроспективная гидрохимическая информация Государственной наблюдательной сети Росгидромета. Проанализированы временные ряды данных о показателях состава и свойств поверхностных вод с 2010 по 2025 годы. Перечень таких показателей включал в себя концентрации главных ионов и органических веществ (по ХПК), а также значения водородного показателя. Всего исследована изменчивость химического состава воды в фоновых и контрольных створах 7 пунктов наблюдений по течению р. Дон и в 6 его основных притоках первого и второго порядка (таблица 1).

О наличии многолетней динамики (тенденции изменения) химического состава рек судили по ранговому τ-коэффициенту корреляции Кендалла между годом наблюдений (факторный признак) и среднегодовой концентрацией вещества (результативный признак). О направленности изменений судили по знаку перед τ: при положительном τ более ранним годам соответствуют более низкие среднегодовые концентрации веществ (тенденция возрастания), при отрицательном τ - наоборот (тенденция убывания). Статистическую значимость τ определяли по t-критерию Стьюдента ($p<0,05$).

Таблица 1 – Сеть гидрохимических наблюдений в бассейне Верхнего Дона для оценки тенденций изменчивости химического состава речных вод

№ п/п	Пункт наблюдений	Створ (обозначение на рис. 1)	
		Фоновый	Контрольный
1	р. Дон, г. Донской	5 км выше города (1ф)	23 км ниже города (1к)
2	р. Дон, г. Данков	1.5 км выше города (2ф)	4.3 км ниже города (2к)
3	р. Дон, г. Лебедянь	3.5 км выше города (3ф)	16.5 км ниже города (2к)
4	р. Дон, г. Задонск	1 км выше города (4ф)	28 км ниже города (2к)
5	р. Дон, г. Воронеж	6 км к СЗ от города (5ф)	11 км к ЮЗ от города (2к)
6	р. Дон, г. Нововоронеж	2.8 км к западу от города (6ф)	2.5 км к ЮЗ от города (2к)
7	р. Дон, г. Лиски	1 км выше города (7ф)	в черте города (2к)
8	р. Красивая Меча, г. Ефремов	0.5 км выше города (8ф)	6.2 км ниже города (2к)
9	р. Сосна, г. Елец	3 км выше города (9ф)	29 км ниже города (2к)
10	р. Воронеж, г. Липецк	4 км выше города (10ф)	4.1 км ниже города (2к)
11	р. Лесной Воронеж, г. Мичуринск	2 км выше города (11ф)	7.8 км ниже города (2к)
12	р. Становая Ряса, г. Чаплыгин	1 км выше города (12ф)	2.5 км ниже города (2к)
13	р. Тихая Сосна, г. Острогожск	2 км выше города (13ф)	6.3 км ниже города (2к)

Скорость изменений среднегодовых концентраций позволяет сравнивать между собой участки водных объектов. Чтобы оценить эту скорость, были найдены угловые коэффициенты линейной регрессии между годом наблюдений и среднегодовой концентрацией. Такой коэффициент показывает, на какую величину в среднем изменится среднегодовая концентрация, если признак «год» увеличится на единицу. Так как ежегодные изменения могут быть малы, для удобства скорость изменений представлена за десятилетие. Следует отметить, что хотя линейная регрессия и даёт общие представления о многолетней изменчивости среднегодовых концентраций, выявленные тенденции, как правило, имели нелинейный характер. Поэтому приведённые в тексте оценки скоростей изменений полезны для характеристики уже произошедших событий, но не могут быть использованы для прогнозирования изменений химического состава в будущие годы.

Результаты

В бассейне Верхнего Дона в современный период отмечается ряд тенденций, имеющих региональный характер (таблица 2, рис.1). Вниз по течению главной реки бассейна от пункта наблюдений у г. Данков до контрольного створа пункта наблюдений у г. Лебедянь увеличивается минерализация воды со скоростью 62,3-80,7 мг/л в 10 лет. Несмотря на то, что ниже г. Лебедянь статистически значимых тенденций увеличения минерализации не выявляется, изменения ионного состава тем не менее наблюдаются, но с меньшей интенсивностью, и это, по всей видимости, не позволяет им проявиться в многолетней динамике суммы главных ионов.

Таблица 2 – Скорость изменений среднегодовых значений показателей состава и свойств воды, мг/л (ед. pH) за 10 лет

Водный объект, пункт наблюдений	Створ	Σ I	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+, K^+	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	pH	ХПК
р. Дон										
р. Дон, г. Донской	Ф	–	–	–	–	-95,7	–	–	–	–
	К	-314	–	-81,0	–	-176	–	–	–	-8,05
р. Дон, г. Данков	Ф	80,7	–	15,4	–	-42,2	-2,7	118	–	-3,35
	К	68,2	–	13,5	–	-43,0	–	108	–	-5,10
р. Дон, г. Лебедянь	Ф	69,2	–	13,8	–	-35,6	–	97,6	–	-4,35
	К	62,3	–	13,5	–	-35,7	–	94,6	–	-5,09
р. Дон, г. Задонск	Ф	–	–	8,5	–	-21,9	–	54,8	–	-3,96
	К	–	–	6,6	–	-22,4	-2,7	52,0	–	-5,63
р. Дон, г. Воронеж	Ф	–	–	–	–	-11,6	–	26,1	-0,25	6,56
	К	–	–	–	–	-11,5	–	25,7	-0,28	–
р. Дон, г. Нововоронеж	Ф	–	–	–	–	-13,8	–	–	-0,42	5,70
	К	–	–	–	–	-10,9	–	23,9	-0,39	3,86
р. Дон,	Ф	–	–	–	–	-20,9	–	24,7	-0,29	–

Водный объект, пункт наблюдений	Створ	Σ I	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+, K^+	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	pH	ХПК
р. Дон										
г. Лиски	К	–	–	–	–	-19,8	–	22,2	-0,30	–
Притоки р. Дон										
р. Красивая Меча, г. Ефремов	Ф	–	–	–	$54,2^{Na+K}$	34,0	9,61	–	–	–
	К	–	–	–	$51,5^{Na+K}$	28,4	8,49	–	–	–
р. Сосна, г. Елец	Ф	33,8	–	11,4	–	-19,8	–	57,1	–	-3,59
	К	–	–	10,3	–	-26,7	–	63,1	–	-4,44
р. Воронеж, г. Липецк	Ф	–	–	–	–	-26,2	–	55,2	–	–
	К	–	–	–	–	-29,7	–	52,2	–	–
р. Лесной Воронеж, г. Мичуринск	Ф	–	-4,9	–	$2,8^{Na}$	–	3,9	–	0,17	–
	К	–	-4,3	4,0	$3,2^{Na}$	6,9	5,5	–	0,26	–
р. Становая Ряса, г. Чаплыгин	Ф	–	–	–	–	-22,0	–	52,7	–	-3,43
	К	–	–	–	–	-20,4	-3,4	48,5	–	-4,67
р. Тихая Сосна, г. Острогожск	Ф	–	–	–	–	-29,2	–	–	-0,49	–
	К	–	–	–	–	-21,2	–	–	-0,28	1,86

Увеличение минерализации в первую очередь связано с повышением среднегодовых концентраций гидрокарбонатов и кальция, что позволяет предполагать усиление выщелачивания известняков в бассейне Верхнего Дона как основной источник их поступления в поверхностные воды. Интенсивность этого процесса вниз по течению реки заметно снижается: после г. Задонск многолетние тренды среднегодовых концентраций кальция становятся статистически незначимыми, а скорость увеличения среднегодовых концентраций гидрокарбонатов падает от 108-118 мг/л за 10 лет у г. Данков до 22,2-26,1 мг/л за 10 лет на участке от г. Воронеж до г. Лиски.

Другой отчетливой тенденцией изменчивости ионного состава воды в современных климатических условиях стало снижение среднегодовых концентраций сульфатов, интенсивность которого также падает вниз по течению главной реки бассейна.

Наиболее серьёзные изменения концентраций сульфатов отмечены в р. Дон у г. Донской. В фоновом створе среднегодовые концентрации за 12 лет наблюдений падали со скоростью около 95,7 мг/л за 10 лет. В контрольном створе такая же динамика снижения среднегодовых концентраций отмечена не только для сульфатов, но и для кальция, а также суммы главных ионов (минерализации) в целом. Среднегодовые концентрации сульфатов за 16 лет наблюдений снизились от 287,9±43,0 мг/л (в 2010-2014 гг.) до 81,1±30,0 мг/л (в 2021-2025 гг.), кальция – от 151,2±23,4 мг/л до 58,7±33,6 мг/л, а суммы главных ионов – от 851,4±88,6 мг/л до 516,6±88,9 мг/л. Кроме того, это единственный в пределах Верхнего Дона пункт, где не выявлена возрастающая динамика концентраций гидрокарбонатов.

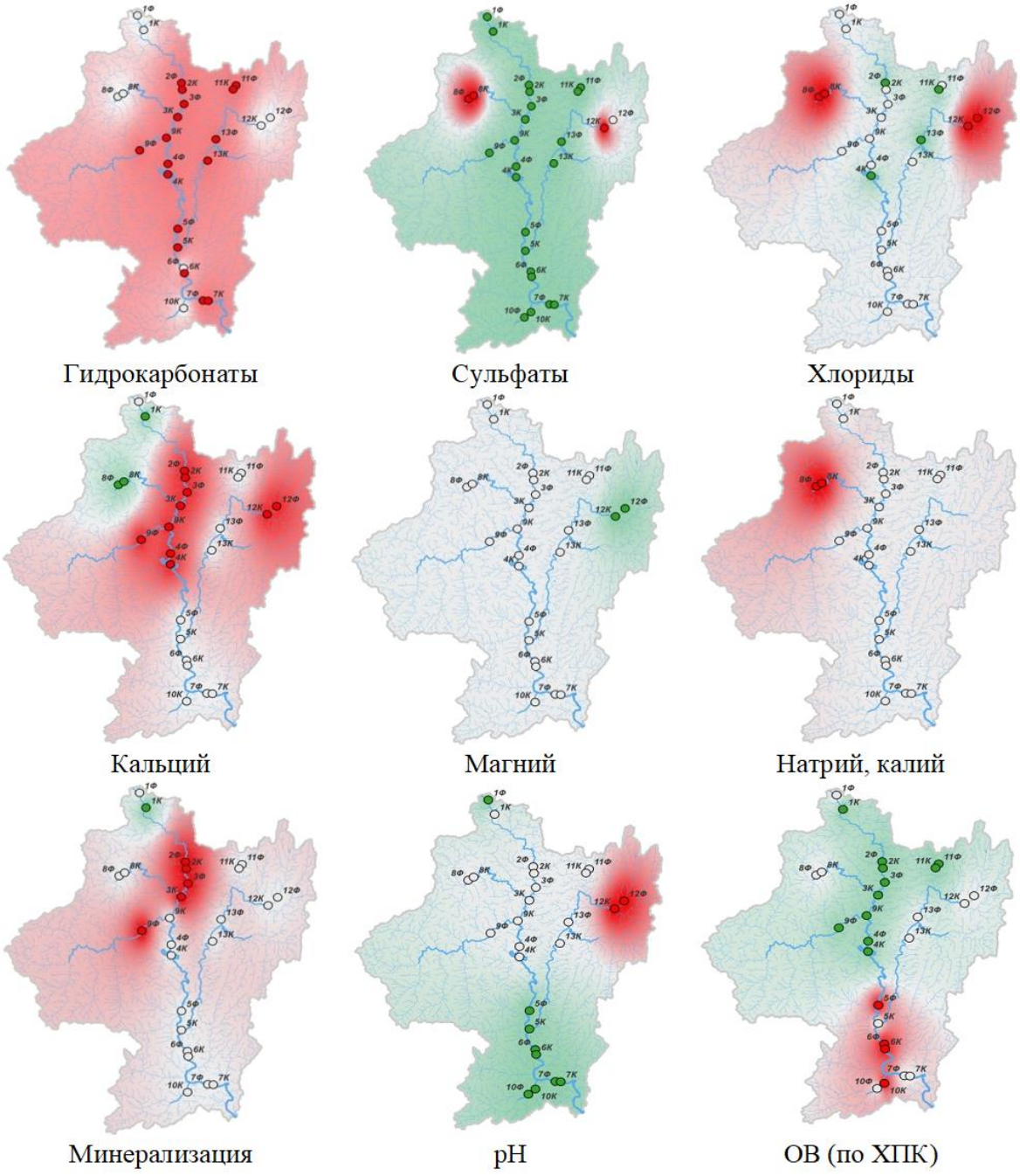


Рис. 1 – Тенденции изменчивости показателей состава и свойств воды в бассейне Верхнего Дона

Примечание: зеленый – снижение значений показателя, красный – увеличение.

В целом пункт наблюдений на р. Дон у г. Донской заметно отличается от остальных пунктов, расположенных на р. Дон, не только интенсивностью, но и направлением выявленных здесь тенденций изменений среднегодовых значений показателей состава и свойств воды.

Эти особенности, а также расположение г. Донской в пределах отработанных буроугольных месторождений (Бобриковского, Широно-Сокольнического, Смородинского и Каменецкого) позволяет предполагать, что исходно высокие

концентрации сульфатов в поверхностных водах, наблюдавшиеся ранее, были связаны с антропогенной деятельностью. Бурый уголь, добывавшийся здесь более 100 лет вплоть до начала 2000-х годов, отличался высоким содержанием серы (до 3 %). Окисление серосодержащих соединений в угле и вмещающих породах до сульфатов и их последующее вымывание с дренажем шахтных и карьерных вод, а также размывов терриконов атмосферными осадками могло быть источником избыточного поступления сульфатов в поверхностные воды. Среднегодовые концентрации сульфатов в этом пункте (особенно в контрольном створе) остаются всё ещё повышенными относительно нижележащих участков, а также притоков р. Дон, так что тенденция их снижения в ближайшие годы вероятнее всего сохранится.

На участке от г. Данков до замыкающего створа у г. Лиски наблюдаются однонаправленные, но разные по интенсивности тенденции уменьшения среднегодовых концентраций сульфатов. Как и в случае с гидрокарбонатами, вниз по течению скорость их снижения постепенно падает от 43,0 до 19,8 мг/л за 10 лет.

Следует отметить и отсутствие многолетних трендов среднегодовых концентраций магния, натрия и калия, а также единичные тренды среднегодовых концентраций хлоридов. Как и в фоновом створе у г. Данков, в контрольном створе у г. Задонск наблюдается также тенденция незначительного снижения среднегодовых концентраций хлоридов со скоростью около 2,7 мг/л за 10 лет. Эти тенденции имеют локальный характер.

Притоки р. Дон в основном повторяют эти тенденции, за исключением рр. Красивая Меча и Лесной Воронеж, в бассейнах которых действие местных азональных факторов превышает силу региональных, что проявляется в увеличении концентраций одновалентных катионов, хлоридов и сульфатов.

Вероятно, наблюдаемые тенденции изменчивости ионного состава поверхностных вод в бассейне верхнего Дона, сложились под действием не только антропогенных факторов (окисление серосодержащих соединений бурого угля и сопутствующих пород до сульфатов, нейтрализация кислых шахтных вод известью или карбонатом кальция и т.д.), но и природных факторов, так как подобные процессы наблюдаются и в притоках, на водосборах которых нет разрабатываемых или отработанных буроугольных месторождений. Трансформация гидрологического режима рек в этой части бассейна сопряжена с уменьшением их питания за счёт талых снеговых вод, обуславливавших поступление в речное русло сульфатов как с осадками, так и с поверхностном склоновым стоком с почвенного покрова при снеготаянии, а также с возрастанием доли грунтового питания водами, обогащенными в результате контакта с

известняковыми породами гидрокарбонатами и кальцием, так как известняки в бассейне Верхнего Дона довольно близко подходят к поверхности, где в них легко проникают атмосферные воды [2].

Значение поверхностного склонового стока талых вод как источника главных ионов ослабло в связи с тем, что в современный период глубина промерзания почв в бассейне Верхнего Дона снизилась, и в начальный момент снеготаяния часть воды уже не формирует поверхностный склоновый сток, как ранее, а впитывается почвой [3, 9] и вступает в контакт со сравнительно неглубоко залегающими известняковыми породами, выщелачивая их. Поглощенные массы талых и дождевых вод, накапливаясь в толщах обширно распространенных в Верхне-Донском районе известняков, образуют локальные обильные водоносные горизонты, питающие реки.

Многолетняя динамика концентраций главных ионов в бассейне Верхнего Дона, по всей видимости, оказывает менее значительное влияние на изменчивость значений водородного показателя, чем отмечаемое тут накопление органических веществ. Хотя среднегодовые значения pH также демонстрируют формирование многолетних тенденций, их локализация в бассейне лучше коррелирует с динамикой увеличения среднегодовых значений ХПК, чем с динамикой главных ионов. Так, среднегодовые значения pH на участке от фонового створа на р. Дон у г. Воронеж до контрольного створа у г. Лиски за последние 15 лет стали ниже на 0,25-0,42 единицы. По видимому, накопление органического вещества, в том числе легкоокисляемого, приводит к последующему усилению процессов его минерализации микроорганизмами, к выделению в воду углекислого газа и образованию угольной кислоты, диссоциация которой повышает концентрацию протонов водорода. Дополнительным механизмом повышения концентрации протонов водорода может быть процесс нитрификации аммонийных ионов до нитритов, накопление которых также отмечается в воде на участке от г. Воронеж до г. Лиски (в настоящей работе не представлено). Кислые продукты распада органических остатков в этой части бассейна в настоящее время, возможно, недостаточно полно нейтрализуются карбонатом кальция, достигающим гумусового горизонта с возвратно-восходящими токами почвенных растворов, и попадают со склоновым стоком в поверхностные воды.

Выводы

Таким образом, в бассейне Верхнего Дона в современный период наблюдаются региональные тенденции изменчивости химического состава воды, которые проявляются в снижении среднегодовых концентраций сульфатов и увеличении концентраций гидрокарбонатов, кальция и минерализации в целом. Интенсивность

трансформации ионного состава речной воды в русле основной реки бассейна Верхнего Дона уменьшается вниз по течению. Причины носят двойственный характер и могут быть связаны как с добычей бурого угля в этой части бассейна, так и с изменением гидрологического режима рек в результате климатических изменений. Большинство притоков Дона следуют этим общим тенденциям, однако в бассейнах рр. Красивая Меча и Лесной Воронеж влияние местных факторов оказывается более значимым, что приводит к иным тенденциям показателей состава и свойств воды: увеличению концентраций одновалентных катионов, хлоридов и сульфатов.

Список литературы

1. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Дон: утв. приказом Донского бассейнового водного управления (Донское БВУ) Федер. агентства вод. ресурсов от 08 апр. 2014 г. № 47 : ввод. в действие с 08.04.2014. – Книга 1: Общая характеристика речного бассейна.

2. Ресурсы поверхностных вод СССР / под ред. М. С. Протасьева. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1973. – Т. 7 : Донской район. – 231 с.

3. Дмитриева В. А. Современные изменения водного режима и морфометрии рек Верхнедонского бассейна // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2020. – № 1. – С. 103–113.

4. Чеснокова А. И. Низкая водность в бассейне Верхнего Дона и водохозяйственные и гидроэкологические последствия современной динамики // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению : материалы докладов всерос. науч. конф., Санкт-Петербург, 23–31 окт. 2020 г. – Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2020. – С. 838–842.

5. Исмайылов Г. Х. Исследование временных закономерностей речного стока бассейна Верхнего Дона // Природообустройство. – 2019. – № 1. – С. 35–40.

6 Дмитриева В. А. Генезис максимумов водности рек и изменчивость водного режима в современный климатический период // Водное хозяйство России. – 2016. – № 5. – С. 50–62.

7. Ежегодник качества поверхностных вод Российской Федерации за 2024 год / ФГБУ «Гидрохимический институт». – Ростов-на-Дону, 2025. – 449 с.

8. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР / под ред. Волкова К.Ю., Котлукова В.А., Лугового Г.И.. – Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1962. – Т. 2. Подмосковный бассейн

и другие месторождения угля центральных и восточных областей европейской части РСФСР – 570 с.

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

ЭКОСИСТЕМНЫЕ УСЛУГИ МОРЕЙ И ПРИМОРСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ЕВРОПЕЙСКОГО ЮГА РОССИИ

Санин А.Ю.
Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, г. Москва
e-mail: *eather86@mail.ru*

Аннотация. Экосистемные услуги ландшафтов суши и водных объектов недостаточно учитываются как в научной, так и практической деятельности, при этом их ежегодная стоимость часто сравнима с доходами, получаемыми от хозяйственной деятельности человека, или даже превышает их. Для морей имеется возможность оценки в качестве услуг использования их биологических и рекреационных ресурсов, несколько сложнее оценить их транспортную услугу и участие в круговоротах вещества и энергии, а также влияние на климат, еще сложнее – эстетическую и некоторые другие. Для ландшафтов суши перечень услуг зависит от типа природной зоны, на юге преобладают степные ландшафты со своим набором предоставляемых ими экосистемных услуг, важнейшую роль среди которых играет почвенное плодородие.

Воздействие человека на природные ландшафты приводит к их необратимым изменениям, что сказывается и на возможностях оказания ими экосистемных услуг, приводит к деградации последних. Стоимость экосистемных услуг природных ландшафтов должна учитываться в управлении природопользованием, часто может быть одним из аргументов, подтверждающим необходимость создания ООПТ и обеспечения их функционирования, реализации мер по охране и восстановлению природы, затраты на реализацию которых часто значительно ниже стоимости экосистемных услуг, оказываемых ландшафтами, а также по обеспечению минимизации воздействия человека на природные ландшафты.

Ключевые слова: экосистемные услуги, рыночная стоимость, типы экосистемных услуг, методы оценки экосистемных услуг.

ECOSYSTEM SERVICES OF THE SEAS AND COASTAL TERRITORIES OF THE EUROPEAN SOUTH OF RUSSIA

Sanin A. Yu.
N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow
e-mail: eather86@mail.ru

Annotation. The ecosystem services of terrestrial landscapes and water bodies are not sufficiently taken into account in both scientific and practical activities, despite the fact that their annual value is often comparable to or even exceeds the income generated by human economic activities. For seas, it is possible to assess the services provided by their biological and recreational resources, but it is more difficult to assess their transport services and their participation in the cycles of matter and energy, as well as their impact on the climate, and even more difficult to assess their aesthetic and other services. For terrestrial landscapes, the list of services depends on the type of natural zone, with steppe landscapes prevailing in the south, which have their own set of ecosystem services, with soil fertility playing a crucial role. Human impact on natural landscapes leads to irreversible changes, which affects the ability of landscapes to provide ecosystem services and leads to their degradation. The value of ecosystem services provided by natural landscapes should be taken into account in the management of environmental resources, and it can often serve as an argument for the creation of protected areas and ensuring their functioning, as well as for implementing measures to protect and restore nature, which often have a lower cost than the value of the ecosystem services provided by landscapes, and for minimizing human impact on natural landscapes.

Keywords: ecosystem services, market value, types of ecosystem services, and methods for assessing ecosystem services.

Введение

Все большую актуальность для управления природопользованием приобретает количественная оценка экологических (экосистемных) услуг, оказываемых природными геосистемами. В ряде случаев их стоимость в случае минимальной трансформации природных геосистем человеком может превышать выгоду, получаемую от их хозяйственного использования, например, сельскохозяйственного или лесохозяйственного. Интенсификация хозяйственного использования природных ландшафтов приводит к полной или частичной утрате способности природных ландшафтов оказывать экологические услуги. Только во второй половине 20 века около 60% мировых экосистемных услуг деградировали [1], что актуализирует необходимость их количественной оценки, ведь лишь в случае ее наличия станет понятной сумма потерь от данного процесса. Высокая степень деградации экосистемных услуг объясняется сокращением площади естественных экосистем: если в начале XX века они были разрушены на 20% суши, то к началу 21 века — на 61–63% территории [2]; данная цифра продолжает расти.

Важность оценки экологических услуг была отмечена как на самом высоком уровне в России, так и на ведущих международных площадках. Президент Российской Федерации отметил необходимость «разработать план действий, направленных на усиление позиций России при формировании международной природоохранной повестки, а также при обсуждении вопросов, касающихся формирования системы компенсаций (платежей) за экосистемные услуги, исходя из понимания роли России как экологического донора».[23] Одним из семи приоритетных направлений развития науки и технологий является «Рациональное природопользование»; количественная оценка экосистемных услуг, предоставляемых природными системами, прямо относится к данному направлению.

Важное значение экосистемным услугам придается в Целях 14 (сохранение морских экосистем) и 15 (сохранение экосистем суши) устойчивого развития ООН (Sustainable Development Goals) на период 2016–2030 гг. [3].

Россия является мировым экологическим донором, на это указывал Президент В.В. Путин; это подчеркивается в докладе «Поворот к природе; новая экологическая политика России и условиях «зеленой трансформации», подготовленного в 2021 году исследователями Высшей школы экономики.[24] Данный тезис подтверждается

[23] Перечень поручений Президента РФ по итогам заседания Государственного совета по вопросу «Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений», состоявшегося 27 декабря 2016 г., режим доступа: http://kremlin.ru/d/53775

[24] https://we.hse.ru/climate/report_nature. Дата обращения: 24.07.2026

имеющимися в России огромными площадями сравнительно слабо измененных человеком бореальных лесов, продуцирующих кислород, и водно-болотных угодий (в том числе и расположенных в приморских территориях, в частности, в пределах устьев крупных рек), депонирующих парниковые газы, что представляется особенно актуальным на фоне глобального потепления и необходимости его сдерживания. По некоторым данным, вклад России в сохранение устойчивости биоты суши составляет примерно 10% [2], что может быть основанием для получения международных компенсаций размером до 5,5% ВВП РФ в год. Однако научное сообщество России недостаточно активно работает над обоснованием значения экосистем страны на международном уровне, а в последнее время и возможности для этого ощутимо сузились.

Расчеты стоимости экологических услуг и их сопоставление с аналогичными расчетами для зарубежных территорий и акваторий подтверждают статус глобального экологического донора для России. Но, как справедливо отмечает С.Н. Бобылев, для сохранения данного статуса необходимо предотвратить деградацию экосистем во многих регионах [3], что нужно учитывать и в управлении природопользованием в приморских территориях и прибрежных акваториях; ниже будет показано, почему именно для приморских территорий и для Юга нашей страны это особенно актуально.

В настоящее время имеются примеры того, что лесные ландшафты в результате воздействия человека могут выделять диоксид углерода в процессе дыхания больше, чем поглощать в процессе фотосинтеза, что приводит к прекращению сдерживания ими глобального потепления. В частности, подобное отмечено для лесов Бразилии[25].

Более 90% стоимости экосистемных услуг не учитываются в управлении природопользованием, так как находятся вне рыночной оценки, что является одной из ключевых причин деградации экосистемных услуг [4,5]. Общая ценность активов океана составит более 24 трлн. долларов в год, что сопоставимо с ВВП США или КНР [4]; при этом в литературе показано, что стоимость экосистемных услуг возрастает [6], что объясняется удорожанием действий по их замещению. Признано, что большинство из них нельзя оценить в денежном эквиваленте. Но денежные оценки можно дополнить количественными и качественными (описательными) характеристиками [5].

В.И. Данилов-Данильян охарактеризовал количественные оценки экосистемных услуг следующим образом: «Функция денежных оценок экологических благ и услуг состоит вовсе не в том, чтобы „отражать“ истинные оценки, „приближаться“ к ним и т.д., от них это не только не требуется – это в принципе им не дано. Денежные оценки – лишь

[25] https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abd4548. Дата обращения: 24.07.2026

операциональные средства, которые могут быть полезными... в определенных условиях. Мы можем лишь заключить условное соглашение: ... денежные оценки экологических благ и услуг удовлетворительно представляют экологические ценности, если помогают решать связанные с ними проблемы управления охраной природы» [7].

Важной характеристикой экосистемных услуг природных ландшафтов Юга нашей страны является высокая степень немобильности большинства из них. Еще более важной представляется экосистемное разнообразие и сложная пространственная структура, что усиливает как многообразие, так и полифункциональность экосистемных услуг. Особенно ценными из них являются те, которые могут считаться ограниченными, и одновременно являются условиями / факторами производства для профильных отраслей региона: рекреационные, почвозащитные, гидрологические [6].

Актуальность оценок экосистемных услуг именно для приморских территорий Юга России объясняется несколькими причинами:

1. Как правило, для прибрежных территорий интенсивность хозяйственной деятельности человека выше, чем для смежных с ними территорий и, тем более, акваторий, что приводит к большему воздействию на природные ландшафты, и к более сильному снижению их способности предоставлять экологические услуги. В связи с тем, что на большей части территории Юга России природные экосистемы претерпели необратимые изменения, в частности, преобразованы в агроценозы, возрастает ценность слабоизмененных человеком ландшафтов. К последним относятся долины временных и постоянных водотоков, прибрежные зоны, высокогорья; они являются ключевыми компонентами экологических каркасов территории. Наличие оценок экосистемных услуг их ландшафтов повышает вероятность принятия управленческих решений, направленных на сохранения таких ландшафтов.

2. Необходимы уточнения оценок, которые имеются для выходящих к морям регионов Юга России - Ростовская область, Краснодарский край, республики Крым и Дагестан и т.д. - для тех частей территорий этих областей, которые относятся к прибрежной зоне. Для новых территорий России оценки экосистемных услуг пока отсутствуют и также необходимы.

3. В силу физико-географических особенностей морей и приморских участков суши стоимость услуг, которые они оказывают, может быть заметно выше, чем стоимость услуг, оказываемых ландшафтами смежных с ними территорий. В качестве примера таких услуг можно назвать транспортную (прибрежные воды используются для судов), эстетическую (общеизвестна эстетическая ценность прибрежных ландшафтов, которая часто заметно выше, чем для смежных с ними территорий), рекреационную

(отчасти вытекающую из эстетической, но здесь еще добавляются ряд возможностей для туристов, которые могут быть реализованы только на побережье, и ценность видов туризма, которые имеют место только на водных объектах), отепляющая как часть климатической (как правило, крупные водоемы смягчают климат, следовательно, снижают расходы на отопление и делают климат более комфортным в целом и т.д.). Отдельно имеет смысл отметить высокое значение рефугиумной функции вследствие характерного для Юга РФ высокого уровня флористического биоразнообразия и эндемизма, и обуславливает возможности для разведения дикороссов [6].

4. Особую ценность для России представляют прибрежные территории, популярные для туризма, которых на Юге России значительное количество. Климат нашей страны сдерживает развитие массовой рекреации на большинстве морских берегов; важно не допустить значительного снижения стоимости рекреационной услуги там, где она высокая, так как это снизит их привлекательность для туристов.

Отдельно следует отметить актуальность количественной оценки экологических услуг, оказываемых морскими геосистемами. Их ценность необходимо учитывать при управлении природопользованием для регионов Юга России, имеющих выход к морю. Для аквальных геосистем морей, омывающих берега России, в том числе и ее Юг, оценки их экосистемных услуг отсутствуют или определены недостаточно, слабее, чем для морей, омывающих побережья других стран, причем не только развитых, а и развивающихся в Африке, Азии и Латинской Америке [4,5], что наряду с прочими факторами сдерживает международное сотрудничество, направленное на предотвращение деградации услуг аквальных систем. Моря, омывающие Юг России, отчасти являются исключением. Так для Черного моря имеются количественные и полуколичественные оценки регулирующих услуг (нуждаются в уточнении), для их оценки и для оценки регулирующих услуг сформирована методологическая основа. Однако для Азовского моря сохраняется критический дефицит данных для оценки экосистемных услуг [8].

Как и по отношению к экосистемным услугам природных ландшафтов суши, ддя оценки услуг аквальных геосистем применяются разнообразные подходы, среди которых особое место занимает оценка «эффекта близости моря». Пример: для Средиземного моря установлено, что доля данного «эффекта» составляет 5% от добавленной стоимости в гостиничном и ресторанном секторах, а также 5% от расходов туристов. В случае с недвижимостью рекреационные экосистемные услуги был оценены также в 5% от добавленной стоимости [9]. Имеются все основания

предполагать схожий эффект и для российских прибрежных туристических территорий, особенно для регионов Юга, популярных среди туристов.

Методы оценки экосистемных услуг морей и приморских территорий

В контексте вопроса оценки экосистемных услуг, имеет смысл говорить о двух типах природных систем, суши и аквальных, для каждого из которых оценка оказываемых экологических услуг осуществляется несколько по-разному; есть отличия и в перечне экосистемных услуг, которые они оказывают, и которые могут быть оценены.

К настоящему времени имеются усредненные оценки суммы экологических услуг, оказываемых водными объектами - они находится в диапазоне 1779–13487 долл./га в год [10]. Для экологических услуг природных ландшафтов суши их величины в целом сопоставимы, но в зависимости от конкретной природной зоны и прочих факторов могут отличаться на порядок и более [11].

Кроме усредненных для природных зон оценок стоимости экосистемных услуг имеются их оценки по административно-территориальным единицам, которые выполнены в рамках проекта TEEB-Russia[26]. Если теоретическое обоснование полученных оценок представляется вполне подробным и обстоятельным и может быть использовано для подобных работ, то собственно оценка проведена, главным образом, сравнительная, и она была усреднена по административным единицам. Но в их пределах ландшафты могут сильно отличаться друг от друга, особенно для регионов с разнообразными природными условиями (Краснодарский край, Дагестан и др.), как и степень их трансформации человеком, и, соответственно, способность даже однородных ландшафтов продолжать оказывать экологические услуги.

Для осуществления оценки экосистемных услуг имеет смысл их предварительная типизация. По общепринятой международной классификации[27] выделяют обеспечивающие, регулирующие, культурные и поддерживающие услуги [5]. Из них методы количественной оценки в наибольшей степени проработаны для обеспечивающих услуг, в наименьшей степени подвержены оценкам многие из культурных (эстетическая и т.д.) и поддерживающих (поддержание биологических круговоротов, почвообразования, очистка окружающей среды, поддержание газового состава атмосферы и т.д.).

[26] http://www.teebweb. org/publication/mainstreaming-the-economics-of-nature-a-synthesis-of-the-approach-conclusions-andrecommendations-of-teeb и. http://www.biodiversity.ru/programs/ecoservices/first-steps/index.html. Дата обращения: 24.07.2026

[27] Там же

Подходы для количественной оценки стоимости экологических услуг были предложены А.А. Тишковым [12]. Они базируются на таких показателях, как общая экономическая ценность и альтернативная (стоимость), затраты, рента, балльные оценки, нормативы, рыночные и косвенные оценки (таблица 1).

Таблица1 - Сопоставление категорий экологических услуг и подходов, которые применяются для их количественной оценки

№№	Категория экологических услуг	Подходы, наилучшие и чаще всего употребляемые для ее оценивания
1	Средообразующие	Альтернативная стоимость, затраты, косвенная оценка
2	Производственные и другие сырьевые ресурсы	Общая экономическая ценность, рыночная оценка
3	Продукционные	Затраты
4	Информационные и духовно-эстетические	Бальная оценка, косвенная оценка

Важно различать потоки услуг за конкретный период (как правило, за год) и ресурсные запасы [8 и др.].

Для регионов Юга России в первую очередь необходимо и возможно оценить следующие экосистемные услуги ландшафтов суши:

- стоимость кормовых трав;
- регулирование климата;
- водообеспечивающая;
- защита берегов от абразии и склоновых процессов;
- эстетическая ценность;
- рефугимная (ценность разнообразия видов растений и животных);
- продуцирование дикороссов;
- рекреационная;
- противодействие процессам опустынивания.

Отдельно целый ряд услуг можно выделить для лесных ландшафтов: продуцирование кислорода, депонирование углерода, стоимость леса как источника древесины и учет ценности произрастающих там дикороссов, сдерживание эрозионных процессов, улавливание пыли и загрязняющих веществ и ряд других. Для некоторых приморских регионов Юга или их отдельных участков – Краснодарского края, республик Крыма и Дагестана, Севастополя - в силу наличия лесов такие оценки также актуальны. Некоторые другие услуги, например, рефугиумная, климаторегулирующая,

водообеспечивающая, поддержание биологических круговоротов, для лесных систем имеют более высокую стоимость, чем для степных. Так, стоимость рек как резервуара пресной воды в вододефицитном Дагестане и в Горном Крыму [13 и др.] составляет десятки миллиардов рублей, а леса стабилизируют их режим.

Также отдельно можно выделить экосистемные услуги водно-болотных угодий, которые значительно выше, чем смежных с ними территорий. Для Юга, в частности, его приморских территорий, они занимают достаточно малый процент территории, однако имеются, наиболее известное из них - Волго-Ахтубинская пойма (стоимость ее услуг в целом заметно выше, чем смежных с ней степных и полупустынных ландшафтов Волгоградской и Астраханской областей и республики Калмыкия [11, 14 и т.д.]. В южных регионах насчитывается 53 водно-болотных угодья, отвечающих критериям Конвенции о водно-болотных угодьях [6].

Для аквальных экосистем морей, омывающих Юг России**,** представляется необходимой оценка как минимум следующих экосистемных услуг:

- *климатическая.* В свою очередь, для нее можно выделить две ключевые составляющие. Первая из них - отепляющая функция, водные, в особенности морские бассейны существенно повышают температуру смежных с ними участков суши. Вторая - осадкоформирующая, поступление в атмосферу водяного пара, которые впоследствии выпадает в виде осадков на суше. По второй существует значительно меньше оценок, чем по первой. Выполненные оценки [15 и др.] показали значительную величину отепляющей составляющей климатической услуги;

- *депонирование загрязняющих веществ*, различными путями поступающих с суши и содержащихся в воде;

- *транспортная.* Большая часть грузов в мире перевозится по морю, грузопотоки проходят в том числе и через прибрежные акватории;

- *рекреационная,* и «примыкающая» к ней эстетическая;

- *участие в круговоротах* веществ, энергии и информации;

-*морские экосистемы как природный резерват* жизни. В литературе подчеркивается особая роль донной растительности и фитопланктона, ведь именно объемы производства первичной биопродукции могут служить основой для количественной оценки ряда экосистемных услуг [8];

- *снабжение* биологическими, минеральными и др. *ресурсами* (нефть, газ, рыба и др.).

В частности, в качестве природного резервата жизни особенно выделяется Каспийский бассейн, который является мировой фабрикой осетровых рыб [6]. Для максимального «раскрытия потенциала» данной экосистемной услуги имеет смысл

интенсифицировать искусственное разведение ценных пород рыб; его важность подчеркивается в ряде стратегических документов.[28] и др.

Заключение

Высокая стоимость экологических услуг, предоставляемых природными экосистемами, позволяет сделать вывод о нежелательности их сильного преобразования человеком для многих районов, ведь в таких случаях вследствие их деградации стоимость услуг, оказываемых их экосистемами, снижается. Данная точка зрения позволяет выявлять недостатки в стратегических документах, руководящих природопользованием в регионе. В частности, Стратегия устойчивого развития Приазовья в соответствии с таким подходом содержит явные противоречия между интенсификацией развития сельскохозяйственной деятельности, которая приводит к эвтрофикации региона (что видно на примере Балтийского моря [15]) и предусмотренной в документе необходимостью снижения биогенной нагрузки [8].

Статья подготовлена в рамках реализации проекта FRRS-2026-0021 «Оптимизация социально-экономической системы Запорожской области посредством развития туристско-рекреационного комплекса».

Список литературы

1. UNEP (2005) Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. Washington DC: Island Press.

2. Бобылев С.Н., Захаров В.М. Экосистемные услуги и экономика. —М.: ООО «Типография ЛЕВКО», Институт устойчивого развития / Центр экологической политики России, 2009. 72с.

3. Бобылев С. Н., Горячева А. А. Идентификация и оценка экосистемных услуг: международный контекст // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. - 2019. -№ 1. С. 225–236

4. Титова Г.Д. Оценка услуг морских экосистем как комплексная междисциполинарная проблема: на пути к решению // Вестнк СПбГУ. – 2014.- сер.7. - вып 3. С. 47-58.

5. Матишов Г.Г., Титова Г.Д. Развитие научных основ рационального морского природопользования // Наука Юга России, 2020. - Т. 16. - № 4. С. 9–18.

[28] Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года. Проект. Разработан Агенством 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.

6. Медяник Н.В. Отраслевые приоритеты капитализации экосистемных услуг в регионах Юга РФ // Вестник экспертного совета, 2022. - № 3 (30). С. 72-81.

7. Данилов-Данильян В.И. 2010. Экологические ценности и экономические оценки. В кн.: Экономика экосистем и биоразнообразия: потенциал и перспективы стран Северной Евразии: Материалы совещания TEEB – экономика экосистем и биоразнообразия: перспективы участия России и других стран ННГ (Москва, 24 февраля 2010 г.). М., Изд-во Центра охраны живой природы: С. 19–26.

8. Андреенко Т.И. Формирование экосистемных услуг Черного и Азовского морей: таксономическая и функциональная структура гидробионтов, методы оценки и экосистемное управление // Биоразнообразие и устойчивое развитие, 2026. - Т.11.- вып. 1. С. 49-64.

9. Micallef A. Towards integrated coastal zone management, with a special emphasis on the Mediterranean Sea: Introduction // Journal of Coastal Conservation. – 2003. -Vol. 9. -N 1. P. 2–4.

10. Russi D., ten Brink P., Farmer A., Badura T., Coates D., Förster J., Kumar R. and Davidson N. The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands. London, Brussels: IEEP; Gland: Ramsar Secretariat. - 2013. P. 10-18.

11. Costanza, R. Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability // Ecosystem Services. - 2020. P. 34 - 43. D0I:10.1016/j.ecoser.2020.101096.

12. Тишков, А. А. Экономика сохранения биоразнообразия / Под ред. А.А. Тишкова. Научные редакторы-составители: д.э.н. С. Н. Бобылев, д.э.н. О. Е. Медведева, к.э.н. С. В. Соловьева // Проект ГЭФ "Сохранение биоразнообразия Российской Федерации". -- Москва : Институт экономики природопользования, 2002. 604 с.

13. Санин А. Ю. Количественная оценка экологических услуг, оказываемых лесными системами Крыма // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки. - 2015. - Т. 3.- № 13. С. 39–47.

14. Ермакова Г.С., Санин А.Ю. Сопоставление стоимости геоэкологических услуг природных систем Волго-Ахтубинской поймы и мероприятий по ее поддержанию и восстановлению // Вестние Волгогр. гос. ун-та. Сер. 11, Естеств. науки. 2016.- № 2 (16). С. 28-35.

15. Санин А.Ю., Кулаковская В.А. К вопросу об экономической оценке экосистемных услуг, оказываемых геосистемами прибрежной зоны Балтийского моря // Государственное управление, электронный вестник. 2021. - №86. С. 115-140.

СВЕРХНОРМАТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ТРАНСГРАНИЧНЫМИ ВОДОТОКАМИ В 2021-2025 ГГ.

Даниленко А.О., *Баумара М.А.*
Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону
e-mail: a.danilenko@gidrohim.mecom.ru

Аннотация: представлены результаты оценки сверхнормативного переноса трансграничными водотоками через границу Российской Федерации за 2021-2025 гг. Выявлены наиболее проблемные с точки зрения российских нормативов качества воды загрязняющие вещества. Наиболее часто отмечается сверхнормативный перенос соединений меди (в 91% пунктов наблюдений), реже - железа общего (88%), органических веществ (по ХПК, 85%), соединений цинка (57%), фосфора фосфатов (44%), в отдельные годы - нефтепродуктов (38%), нитритного азота (31%), сульфатов (19%), аммонийного азота (19%), суммы ионов (4%). Сверхнормативного переноса хлоридов и нитратного азота из года в год не наблюдается.

Ключевые слова: трансграничный перенос загрязняющих веществ, поверхностные воды, трансграничные водотоки, сверхнормативный перенос.

EXCESSIVE TRANSFER OF POLLUTANTS BY TRANSBOUNDARY WATERCOURSES ACROSS THE BORDER OF THE RUSSIAN FEDERATION IN 2021–2025

Danilenko A.O., Baumara M.A.
Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don
e-mail: a.danilenko@gidrohim.mecom.ru

Abstract: The article presents the results of assessing excessive transfer of pollutants by transboundary watercourses across the border of the Russian Federation for the period 2021–2025. Pollutants that are most problematic in terms of Russian water quality standards have been identified. Excessive transfer is most frequently recorded for copper compounds (at 91% of monitoring stations), less frequently for total iron (88%), organic matter (measured as COD, 85%), zinc compounds (57%), phosphate-phosphorus (44%), and in individual years — petroleum products (38%), nitrite nitrogen (31%), sulfates (19%), ammonium nitrogen (19%), and total ions (4%). No annual excessive transfer of chlorides or nitrate nitrogen has been observed.

Keywords: transboundary transfer of pollutants, surface waters, transboundary watercourses, excessive transfer.

Введение

Государственную границу Российской Федерации пересекает свыше 800 различных водных объектов, среди которых – 70 больших и средних рек, жизненно важных как для России, так и для граничащих с ней государств. Более половины государственной границы РФ проходит по водным объектам: 7141 км – по рекам, 475 км – озерам и 38807 км – по морям [1].

Необходимость совместного использования трансграничных вод может приводить к возникновению напряженности между Россией и соседними государствами из-за вопросов национальной безопасности, устойчивого развития экономики и экологической стабильности. Исследования качества воды трансграничных водотоков способствуют пониманию процессов распространения загрязняющих веществ в окружающей среде, повышению эффективности мониторинга качества трансграничных

водных ресурсов и их управления, а также формированию научной базы для международного сотрудничества в области охраны трансграничных водных ресурсов.

Россия имеет соглашения, регулирующие использование трансграничных водных ресурсов с соседними странами, а в 1992 г. наша страна присоединилась к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, подписанной в г. Хельсинки. Однако такие международные соглашения имеют общий недостаток: отсутствуют согласованные механизмы экологического нормирования и взаимной ответственности государств за превышение допустимых уровней загрязнения вод, что не способствует активизации работ по оздоровлению трансграничных водных объектов. Так как каждое государство адаптирует нормативы качества воды под свои климатические условия, состояние экосистем и требования к водопользованию, такие нормативные концентрации загрязняющих веществ в поверхностных водах могут существенно различаться в зависимости от страны и региона.

Сверхнормативный перенос загрязняющих веществ представляет собой особый вид оценки качества воды водного объекта, основанной на сравнении фактически наблюдаемого переноса с нормативным. Такая оценка меньше связана с учётом процессов смешения и разбавления загрязнённых масс воды и потому может быть более представительной для участка ниже трансграничного створа гидрохимических наблюдений, то есть для расположенного на территории сопредельного государства.

В настоящей работе представлен сверхнормативный перенос трансграничными водотоками через границу Российской Федерации за последние пять лет и выявлены наиболее проблемные с точки зрения российских нормативов качества воды загрязняющие вещества.

Материалы и методы

Для расчёта трансграничного переноса загрязняющих веществ использован прямой метод, применяемый при наличии наблюдений по гидрохимическим и гидрологическим показателям [2]:

$$G = \sum_{i=1}^{m} W_i \times C_i$$

где G - количество перенесённого вещества за расчётный период, тыс.т; m - число интервалов расчётного периода; W_i – объём стока воды за i-й интервал расчётного периода, км^3; C_i – средняя концентрация вещества за i-й интервал расчётного периода, мг/л или мкг/л (при расчёте сверхнормативного переноса вместо C_i подставляют нормативную концентрацию).

Сверхнормативный перенос рассчитан как отношение фактического переноса, вычисленного по данным наблюдений, к нормативному переносу, вычисленному по нормативной концентрации. За нормативную концентрацию принята наименьшая из приведённых в [3] и [4].

Расчёт переноса загрязняющих веществ через государственную границу выполнен по результатам режимных наблюдений за загрязнением поверхностных водных объектов, проведённых Управлениями Гидрометеослужбы (Росгидромет) на 26 реках в 26 пунктах, расположенных на границе: по 1 – с Эстонией, Грузией, Азербайджаном и Китаем; по 3 – с Польшей и Республикой Беларусь; 4 – с Финляндией, 5 – с Монголией и 7 – с Казахстаном. Гидрологические посты совмещены со створами гидрохимических наблюдений или расположены вблизи них в 25 пунктах. Для р. Сож (пгт Хиславичи) водный сток рассчитан по данным пункта с. Ускосы без коэффициента пересчёта, учитывающего изменение площади водосбора, так как расстояние между пунктами незначительное. Для расчёта переноса веществ р. Самур (г. Усухчай) использовано среднее многолетнее значение водного стока в связи с отсутствием актуальных гидрологических наблюдений.

Результаты

В ряду встречаемости сверхнормативного переноса в трансграничных пунктах наблюдений показатели располагаются следующим образом: соединения меди (91%) – железо общее (88%) – органические вещества (ОВ по ХПК, 85%) – соединения цинка (57%) – фосфор фосфатов (44%) – нефтепродукты (38%) – нитритный азот (31%) – сульфаты (19%) – аммонийный азот (19%) – сумма ионов (4%). Кроме того, по ряду показателей сверхнормативного переноса из года в год не наблюдается (таблицы 1 и 2). К таким показателям относятся хлориды и нитратный азот.

В целом следует отметить, что превышение нормативного переноса главных ионов встречается наиболее редко в сравнении с остальными группами загрязняющих веществ. Как сказано ранее, нигде не выявлен сверхнормативный перенос хлоридов, всего в один год наблюдений превышена норма переноса суммы главных ионов с водой р. Тобол, однако сверхнормативный перенос сульфатов на границе с Казахстаном и Азербайджаном время от времени отмечается с водой рек как поступающих на территорию России (рр. Илек, Уй, кратность превышения нормативного переноса до 1,4 раза), так и вытекающих с неё (рр. Ишим и особенно Тобол, кратность превышения нормативного переноса до 2,2 раза).

Чаще отмечается сверхнормативный перенос биогенных соединений, особенно на границе с Польшей и Республикой Беларусь. Не обнаружен сверхнормативный перенос нитратного азота. Редко наблюдался сверхнормативный перенос аммонийного азота, в основном через границу с Казахстаном (однократно с водой рр. Большой Узень, Илек и Уй из Казахстана на территорию России, с водой р. Иртыш – в Казахстан, а также с водой р. Мамоновка с территории Польши). В основном кратность превышения нормативного переноса аммонийного азота невелика – в 1,1-1,9 раза, но с водой р. Илек она достигала 2,7 раза.

Таблица 1 - Кратность превышения нормативного переноса главных ионов, органических веществ и нефтепродуктов трансграничными водотоками через границу с сопредельными государствами в 2021-2025 г.

Река	Пункт наблюдений	Направление течения	Σ	SO_4^{2-}	Cl^-	ОВ	НФПР
Граница с Финляндией							
Патсо-йоки	пгт Кайтакоски	втекает в РФ	–	–	–	–	–
Вуокса	пгт Лесогорский	втекает в РФ	–	–	–	до 1,6	–
Селезневка	ст. Лужайка	втекает в РФ	–	–	–	2,0-2,7	–
Лендерка	п. Лендеры	вытекает из РФ	–	–	–	1,4-2,5	–
Граница с Эстонией							
Нарва	г. Ивангород	вытекает из РФ	–	–	–	до 1,9	–
Граница с Польшей							
Анграпа	д.Берестово	втекает в РФ	–	–	–	2,2-2,3	н.д.
Лава	г. Знаменск	втекает в РФ	–	–	–	1,8-2,4	–
Мамоновка	г. Мамоново	втекает в РФ	–	–	–	1,6-2,4	–
Граница с Беларусью							
Зап. Двина	г. Велиж	вытекает из РФ	–	–	–	2,3-3,4	–
Днепр	г. Смоленск	вытекает из РФ	–	–	–	1,7-2,1	до 1,4
Сож	пгт Хиславичи	вытекает из РФ	–	–	–	1,4-1,9	–
Граница с Грузией							
Терек	г. Владикавказ	втекает в РФ	–	–	–	–	–
Граница с Азербайджаном							
Самур	с. Усухчай	по границе с РФ	–	до 1,2	–	–	до 1,3
Граница с Казахстаном							
М. Узень	с. Малый Узень	вытекает из РФ	–	–	–	1,6-2,3	до 1,4
Б.Узень	г. Новоузенск	вытекает из РФ	–	–	–	1,6-2,5	до 1,6
Илек	п. Веселый	вытекает из РФ	–	до 1,3	–	1,5-2,0	–
Уй	г. Троицк	вытекает из РФ	–	до 1,4	–	1,3-1,8	до 2,7
Тобол	с. Звериноголовское	втекает в РФ	до 1,2	1,1-2,2	–	1,2-1,8	1,7-3,1
Ишим	с. Ильинка	втекает в РФ	–	до 1,7	–	до 2,0	–
Иртыш	с. Татарка	втекает в РФ	–	–	–	–	–
Граница с Монголией							
Селенга	п. Наушки	втекает в РФ	–	–	–	до 1,6	до 1,6
Онон	с. В.Ульхун	втекает в РФ	–	–	–	до 1,7	–
Киран	с. Киран	втекает в РФ	–	–	–	до 1,3	до 1,5
Ульдза-Гол	с. Соловьевск	втекает в РФ	–	–	–	1,3-2,6	до 3,5
Кыра	с. Кыра	вытекает из РФ	–	–	–	1,1-2,2	–
Граница с Китаем							
Раздольная	с. Новогеоргиевка	втекает в РФ	–	–	–	1,3-2,6	до 1,3

Сверхнормативный перенос нитритного азота зафиксирован в большем числе трансграничных водотоков – не только во всех пунктах наблюдений на границе с Польшей, но и в части пунктов на границе с Казахстаном (рр. Илек и Тобол), Китаем (р. Раздольная), Беларусью (р. Днепр) и Финляндией (р. Селезнёвка). Как правило, кратность превышения нормативного переноса нитритного азота с водой этих рек колебалась от 1,2 до 2,2 раза, за исключением р. Селезнёвка, где однократно это превышение достигло 3,2 раза, а также р. Мамоновка, с водой которой кратность сверхнормативного переноса нитритного азота из года в год колеблется от 2,2 до 2,8 раза.

Таблица 2 - Кратность превышения нормативного переноса биогенных веществ и соединений тяжёлых металлов трансграничными водотоками через границу с сопредельными государствами в 2021-2025 гг.

Река	Пункт наблюдений	$N(NH_4^+)$	$N(NO_2^-)$	$N(NO_3^-)$	$P(PO_4^{3-})$	$Fe_{общ}$	Cu	Zn
Граница с Финляндией								
Патсо-йоки	пгт Кайтакоски	–	–	–	–	–	1,1-2,3	до 1,3
Вуокса	пгт Лесогорский	–	–	–	–	до 2,2	4,3-9,7	–
Селезневка	ст. Лужайка	–	до 3,2	–	–	3,6-5,0	5,9-8,0	1,3-2,5
Лендерка	п. Лендеры	–	–	–	–	2,5-3,8	–	–
Граница с Эстонией								
Нарва	г. Ивангород	–	–	–	–	до 1,3	до 4,2	–
Граница с Польшей								
Анграпа	д. Берестово	–	1,6-2,1	–	1,1-3,0	1,6-2,7	н.д.	н.д.
Лава	г. Знаменск	–	1,5-2,1	–	1,3-1,5	1,7-2,4	н.д.	н.д.
Мамоновка	г. Мамоново	до 1,2	2,2-2,8	–	3,0-3,3	2,4-3,9	н.д.	н.д.
Граница с Беларусью								
Зап. Двина	г. Велиж	–	–	–	до 1,3	5,6-7,6	2,4-7,7	до 1,2
Днепр	г. Смоленск	–	до 1,6	–	1,6-5,1	4,3-6,7	2,7-10,5	до 2,4
Сож	пгт Хиславичи	–	–	–	1,3-2,5	3,3-5,5	2,1-11,1	1,1-2,8
Граница с Грузией								
Терек	г. Владикавказ	–	–	–	–	–	–	–
Граница с Азербайджаном								
Самур	с. Усухчай	–	–	–	–	до 1,2	1,5-2,2	–
Граница с Казахстаном								
М. Узень	с. Малый Узень	–	–	–	до 1,6	до 1,4	1,4-5,9	–
Б.Узень	г. Новоузенск	до 1,2	–	–	до 3,4	–	до 6,3	–
Илек	п. Веселый	до 2,7	до 1,4	–	до 2,1	до 1,9	1,3-4,0	до 1,6
Уй	г. Троицк	до 1,9	–	–	–	до 1,2	3,1-4,1	3,2-4,9
Тобол	с. Звериноголовское	–	до 1,2	–	н.д.	до 3,3	1,5-4,2	1,1-2,6
Ишим	с. Ильинка	–	–	–	–	до 5,4	2,1-4,5	до 1,9
Иртыш	с. Татарка	до 1,1	–	–	–	до 1,1	3,6-5,7	
Граница с Монголией								
Селенга	п. Наушки	–	–	–	–	1,2-2,4	1,1-2,7	до 1,2
Киран	с. Киран	–	–	–	1,8-2,8	до 3,8	1,6-3,7	до 1,4
Кыра	с. Кыра	–	–	–	–	1,4-2,5	до 3,7	–
Онон	с. В.Ульхун	–	–	–	–	до 2,6	до 3,2	–
Ульдза-Гол	с. Соловьевск	–	–	–	–	до 1,9	1,3-3,6	до 1,1
Граница с Китаем								
Раздольная	с. Новогеоргиевка	–	до 1,7	–	до 2,2	4,8-16,0	3,0-10,9	до 2,4

Зафиксирован сверхнормативный перенос фосфора фосфатов с водой всех рек, пересекающих границу с Польшей (превышение в 1,1-3,3 раза) и с Республикой Беларусь (в 1,3-5,1 раза), а также с водой некоторых рек, вытекающих на территорию Казахстана (Илек, Малый и Большой Узень, в 1,6-3,4 раза). На границе с Монголией сверхнормативный перенос фосфора фосфатов характерен только для р. Киран (в 1,8-2,8 раза). Однократно за последние 5 лет также был выявлен сверхнормативный перенос фосфора фосфатов с водой р. Раздольная на границе с Китаем (в 1,7 раза).

Сверхнормативный перенос органических веществ (по ХПК) из года в год наблюдается в 80-85 % обсуждаемых трансграничных водотоков: во всех реках на границе с Польшей и Эстонией (превышение в 1,6-2,3 раза), с Республикой Беларусь (в 1,4-3,4 раза), с Китаем (в 1,3-2,6 раза), в большинстве рек на границе с Казахстаном (в 1,2-2,5 раза, исключая р. Иртыш и в отдельные годы – р. Ишим) и Монголией (в 1,1-2,6 раза, исключая в отдельные годы рр. Селенга, Онон и Киран) и части рек на границе с Финляндией (в 1,4-2,7 раза, исключая р. Патсо-Йоки и в отдельные годы – р. Вуокса). Сверхнормативный перенос органических веществ (по ХПК) не характерен для рек, пересекающих границы государств Закавказья, – Азербайджана и Грузии.

Сверхнормативный перенос нефтепродуктов однократно за период с 2021 по 2025 гг. встречался в отдельных водотоках на границе с Республикой Беларусь (р. Днепр, кратность превышения нормативного переноса в 1,4 раза), с Азербайджаном (р. Самур, в 1,3 раза), с Казахстаном (рр. Большой и Малый Узень, Уй, в 1,4-2,7 раза), с Монголией (рр. Селенга, Киран и Ульдза-Гол, в 1,6-3,5 раза) и с Китаем (р. Раздольная, в 1,3 раза). Чаще фиксировался сверхнормативный перенос нефтепродуктов на территорию Российской Федерации из Казахстана с водой р. Тобол (1,7-3,1 раза).

Наиболее значимые и многочисленные нарушения нормативного переноса в период с 2021 по 2025 гг. отмечены для соединений тяжёлых металлов, в первую очередь, меди, в несколько меньшей степени – общего железа и соединений цинка.

Трансграничный перенос соединений меди регулярно превышает нормативные значения с водой всех водотоков, пересекающих границу с Республикой Беларусь (в 2,1-11,1 раза), Азербайджаном (в 1,5-2,2 раза), Китаем (в 3-10,9 раза), с водой большей части водотоков на границе с Казахстаном (в 1,3-5,9 раза, исключая р. Большой Узень в отдельные годы) и с Монголией (в 1,1-3,7 раза, исключая рр. Кыра и Онон в отдельные годы). Исключение составляют только рр. Лендерка и Терек – перенос соединений меди этими водотоками в 2021-2025 гг. оставался в пределах нормативных значений.

Перенос общего железа превысил нормативный во всех водных объектах на границах с Эстонией и Польшей (в 1,3-3,9 раза), Беларусью (в 3,3-7,6 раза) и Китаем (в 4,8-16 раз), в отдельные годы – на границе с Азербайджаном (в 1,3 раза), а также в

большинстве водных объектов на границе с Финляндией (в 2,5-5,0 раза, с водой р. Вуокса однократно в 2,2 раза), с Казахстаном (превышение наблюдалось в отдельные годы в 1,2-5,4 раза) и Монголией (в рр. Селенга и Кыра в 1,2-2,5 раза, однократно с 2021 по 2025 гг. в рр. Киран, Онон и Ульдза-Гол в 1,9-3,8 раза). Исключение составили рр. Патсо-йоки, Терек и Большой Узень – перенос соединений общего железа этими водотоками в 2-21-2025 гг. остался в пределах нормативных значений.

Перенос соединений цинка превысил нормативный во всех водных объектах на границах с Беларусью (в 1,1-2,8 раза, регулярно с водой р. Сож, однократно – с водой рр. Западная Двина и Днепр), в части водотоков на границе с Финляндией (регулярно с водой р. Селезнёвка, однократно – с водой р. Патсо-йоки, в 1,3-2,5 раза), Казахстаном (регулярно с водой рр. Тобол и Уй в 1,1-4,9 раза, однократно с водой рр. Илек и Ишим в 1,6-1,9 раза), Монголией и Китаем (однократно с водой рр. Селега, Киран и Ульдза-Гол в 1,1-2,4 раза). Не характерен сверхнормативный перенос соединений цинка на границах с государствами Закавказья, Эстонии, с водой рр. Лендерка и Вуокса на границе с Финляндией, с водой рр. Большой и Малый Узень и Иртыш на границе с Казахстаном, с водой рр. Онон и Кыра на границе с Монголией.

Выводы

Таким образом, приоритетными веществами, перенос через границу которых регулярно превышает нормативные значения (с учётом нормативов качества воды Российской Федерации), являются соединения тяжёлых металлов, в особенности меди и общего железа, а также органические вещества. На западной границе Российской Федерации также регулярно фиксируется сверхнормативный перенос биогенных соединений, в первую очередь фосфора фосфатов и нитритного азота.

Список литературы

1. Фрумин Г. Т., Тимофеева Л. А. Трансграничные водные объекты и водосборы России: проблемы и пути решения // Биосфера. – 2014. – Т. 6, № 2. – С. 118-133.

2. РД 52.24.508-96. Организация и функционирование подсистемы мониторинга состояния трансграничных поверхностных вод суши. г. Ростов-на-Дону, 1996. — 46 с.

3. Приказ Федерального агентство по рыболовству от 26 мая 2025 г. № 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»: зарегистрировано в Минюсте России 2 июня 2025 г. № 82497.

4. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21

«Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: зарегистрировано в Минюсте России 29 апреля 2021 г. Регистрационный № 63292.

КАЧЕСТВО ОРОСИТЕЛЬНЫХ ВОД В РЕСПУБЛИКЕ КАЛМЫКИЯ

Адучиева М.Г., Кониева Г.Н.
Калмыцкий филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Элиста
e-mail: marianna.aduchieva@yandex.ru

Аннотация: В статье представлены результаты комплексного исследования качества оросительных вод и состояния обводнительно-оросительных систем Республики Калмыкия. Проанализированы характеристики пяти основных ООС региона: Черноземельской, Сарпинской, Калмыцко-Астраханской, Право-Егорлыкской и Каспийской, охватывающих общую площадь орошаемых земель 80,9 тыс. га. Проведена оценка качества водных ресурсов, поступающих в системы из внешних источников (рек Волги, Кубани, Терека и Кумы). Полученные результаты имеют важное практическое значение для оптимизации водопользования и разработки мероприятий по повышению эффективности функционирования оросительных систем Республики Калмыкия.

Ключевые слова: оросительные системы, структура водопользования, мелиорация, показатели качества воды.

QUALITY OF IRRIGATION WATER IN THE REPUBLIC OF KALMYKIA

Aduchieva M.G., Konieva G.N.
Kalmyk branch of FGBNU "FNC VNIIGiM them. A.N. Kostyakova, Elista
e-mail: marianna.aduchieva@yandex.ru

Annotation: The article presents the results of a comprehensive study of the quality of irrigation water and the state of the irrigation systems in the Republic of Kalmykia. The characteristics of the five main irrigation systems in the region, including the Chernozemelskaya, Sarpinskaya, Kalmytsko-Astrakhanskaya, Pravoyegorlykskaya, and Kaspiyskaya systems, which cover a total area of 80.9 thousand hectares of irrigated land, have been analyzed. The quality of the water resources entering the systems from external sources (the Volga, Kuban, Terek, and Kuma rivers) has been assessed. The obtained results are of great practical importance for optimizing water use and developing measures to improve the efficiency of irrigation systems in the Republic of Kalmykia.

Keywords: irrigation systems, water use structure, land reclamation, water quality indicators.

Республика Калмыкия маловодный регион Российской Федерации, в которой наблюдается острый дефицит воды, поступающей по каналам и применяемой для орошения, обводнения и водоснабжения. Среди важнейших проблем водохозяйственного и мелиоративного комплексов республики – загрязнение водных объектов, трудности в обеспечении населения водой, сокращение запасов подземных вод, износ оросительной сети и гидротехнических сооружений, а также вторичное засоление земель [1-3].

На территории республики функционируют пять крупных обводнительно-оросительных систем (ООС): Черноземельская (ЧООС), Сарпинская (СООС), Калмыцко-Астраханская (КАООС), Право-Егорлыкская (ПЕООС), и Каспийская (КООС). Общая протяженность сети оросительных каналов достигает 1137 км, а сбросных коллекторов – 633 км. Площадь земель, находящихся под орошением, в

настоящее время составляет 80,9 тыс. га, при этом из 22,6 тыс. га земель, орошаемых на регулярной основе, половина площадей поливают водой, качество которой не соответствует нормативам, отмечается повышенная минерализация и неблагоприятный химический состав. Свыше 70 % орошаемых земель характеризуются удовлетворительным эколого-мелиоративным состоянием, к качеству используемой для полива воды необходимо предъявлять строгие требования. Качественный состав поливной воды является важнейшим показателем устойчивости экологической системы [4-6].

В связи с ограниченностью местных водных ресурсов хорошего качества, для удовлетворения потребностей разных отраслей хозяйства региона (включая мелиоративные нужды) основную часть воды приходится привлекать из-за ее пределов – рек Волги, Кубани, Терека и Кумы (табл. 1). Наибольшие объемы привлекаемых из вне водных ресурсов составляют: из Волги подается 65 %, из р. Терек и Кумы – 18 %, и из Кубани – 14 %. В целом суммарный забор на современном этапе не превышает 55 % от установленного лимита [7].

На небольших площадях, используются воды местного стока, аккумулированные в прудах и озерах. Результаты качественной оценки вод практически всех водоемов Калмыкии свидетельствуют о высокой степени их засоленности: минерализация варьируется в диапазоне от 1,5 до 14,0 г/л – такие воды классифицируются как соленые и сильносоленые [8].

Данные получены на основе материалов информационного портала ФГБНУ ВНИИ «Радуга», а также результатов количественного химического анализа проб воды, выполненного в почвенно-аналитической лаборатории Калмыцкого филиала ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ имени А. Н. Костякова».

Таблица 1 – Годовой лимит водоподачи в Республику Калмыкия из внешних источников

Наименование обводнительно-оросительных систем	Водоисточник	Лимиты водоподачи в республику, тыс. м^3
Черноземельская	р. Терек, Кума	180260
Сарпинская	р. Волга	151800
Право-Егорлыкская	р. Кубань	32060
Каспийская	р. Бахтемир, Каспийское море	6940
Итого		371060

ЧООС расположена в самой засушливой зоне республики, является самой крупной в Калмыкии. Общая площадь орошаемых и обводняемых земель на 01.01.2026 составляет 40,393 тыс. га. Пополняется водохранилище водами рек Кумы и Терека, а

также местного стока. Годовой лимит подачи воды в Черноземельскую ООС из внешних источников равен 180,260 млн. м^3/год. Фактический физический износ мелиоративной системы 78,55 %. Анализ структуры водопользования показывает, что большая часть воды расходуется на орошение (27,60 %) и другие нужды мелиорации (21,40 %), на обводнение пастбищ идет 7,50 % воды (рис. 1).

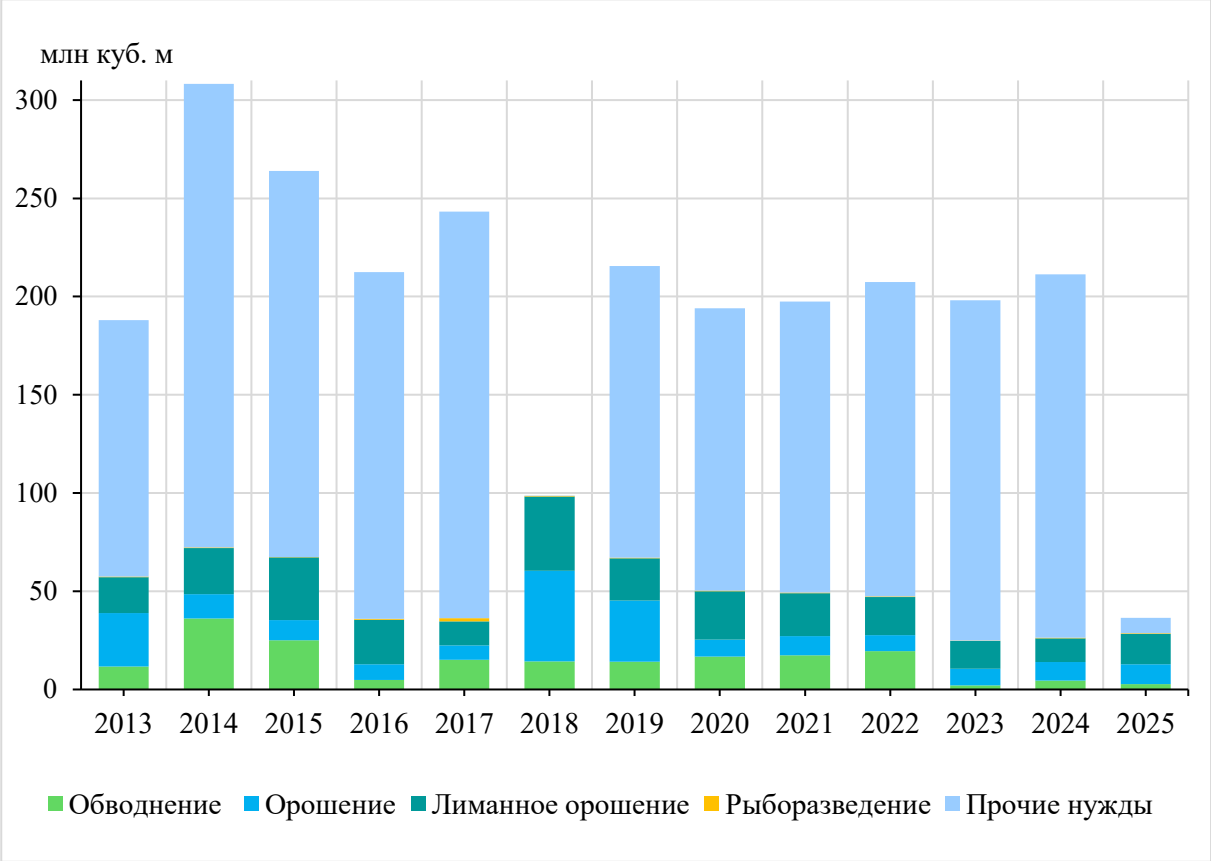


Рис. 1- Структура водораспределения на Черноземельской обводнительно-оросительной системе Республики Калмыкия, млн. м^3

Химический состав воды из ЧООС характеризуются повышенной минерализацией, суммарное содержание солей варьирует от 0,904 до 1,070 г/л, что соответствует II классу качества по классификации С. Я. Бездниной. Химический состав вод – хлоридно-сульфатно-магниево-натриевый, хлоридно-сульфатно-кальциево-магниевый. Реакция среды слабощелочная, значения pH составляют 8,0–8,1 (табл. 2). Такое содержание показателей (высокая минерализация, хлоридно-сульфатный тип, заметная доля натрия) определяет необходимость контроля за процессами засоления и осолонцевания при использовании этих вод для орошения.

СООС размещена на Сарпинской низменности – ее территория охватывает Волгоградскую и Астраханскую области, а также Республику Калмыкия. В пределах Калмыкии под орошение и обводнение задействовано 31,064 тыс. га земель, при этом годовой лимит водоподачи из внешних источников составляет 151,8 млн. м^3.

Мелиоративная система характеризуется высоким уровнем физического износа, который достигает 99,53 %. Согласно анализу структуры водопользования, преобладающая доля водных ресурсов (66,40 %) направляется на орошение. На прочие мелиоративные нужды расходуется 3,62 % воды, а на обводнение пастбищ тратится небольшая часть – 6,25 %.

Таблица 2 – Химический состав воды по обводнительно-оросительным системам Калмыкии на начало поливного сезона, 2026 год

Место отбора	Концентрация ионов, г/л / мг-экв/л / % мг-экв							Сумма солей, г/л	pH	Химизм воды по ионам, % мг-экв
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+			
Черноземельская обводнительно-оросительная система										
ЧМК	-	0,165	0,185	0,312	0,080	0,084	0,078	0,904 (II)	8,0	$ClSO_4CaMg$
	-	2,70	5,20	6,50	4,00	7,00	3,40			
	-	9,38	18,06	22,56	13,89	24,31	11,80			
к. Гашунский распред-ель	0,006	0,159	0,185	0,300	0,090	0,054	0,121	0,926 (II)	8,1	$ClSO_4MgNa$
	0,20	2,60	5,20	6,25	4,50	4,50	5,25			
	0,70	9,12	18,25	21,93	15,79	15,79	18,42			
к. УС-5	0,002	0,189	0,213	0,360	0,110	0,066	0,130	1,070 (II)	8,0	$ClSO_4MgNa$
	0,05	3,10	6,00	7,50	5,50	5,50	5,65			
	0,15	9,31	18,02	22,52	16,52	16,52	16,96			
Сарпинская обводнительно-оросительная система										
Волжская вода к. ВР-1	-	0,153	0,046	0,024	0,044	0,024	0,002	0,293 (I)	7,8	$ClHCO_3MgCa$
	-	2,50	1,30	0,50	2,20	2,00	0,10			
	-	29,07	15,12	5,81	25,58	23,26	1,16			
к. Р-1	-	0,177	0,043	0,024	0,050	0,024	0,002	0,320 (I)	7,7	$ClHCO_3MgCa$
	-	2,90	1,20	0,50	2,50	2,00	0,10			
	-	31,52	13,04	5,44	27,17	21,74	1,09			
Право-Егорлыкская обводнительно-оросительная система										
к. РР-1	-	0,134	0,036	0,024	0,040	0,018	0,005	0,256 (I)	7,6	$ClHCO_3MgCa$
	-	2,20	1,00	0,50	2,00	1,50	0,20			
	-	29,73	13,51	6,76	27,03	20,27	2,70			
к. Леводжалгинский	-	0,122	0,021	0,024	0,030	0,018	0,002	0,218 (I)	7,8	$ClHCO_3MgCa$
	-	2,00	0,60	0,50	1,50	1,50	0,10			
	-	32,26	9,68	8,06	24,19	24,19	1,62			
к. Праводжалгинский	-	0,146	0,085	0,024	0,040	0,024	0,030	0,350 (I)	7,7	$ClHCO_3MgCa$
	-	2,40	2,40	0,50	2,00	2,00	1,30			
	-	22,64	22,64	4,72	18,87	18,87	12,26			
Каспийская обводнительно-оросительная система										
р. Бахтемир	-	0,171	0,021	0,024	0,050	0,012	0,009	0,287 (I)	7,7	$ClHCO_3MgCa$
	-	2,80	0,60	0,50	2,50	1,00	0,40			
	-	35,90	7,69	6,41	32,05	12,82	5,13			
к. Каспийский	-	0,183	0,050	0,072	0,060	0,018	0,032	0,415 (I)	7,8	SO_4HCO_3MgCa
	-	3,00	1,40	1,50	3,00	1,50	1,40			
	-	25,42	11,86	12,72	25,42	12,72	11,86			

Примечание: классификация С.Я. Бездниной; в скобках класс оценки качества воды

Воды СООС отличаются невысокой минерализацией, содержание солей варьируется в диапазоне от 0,256 до 0,320 г/л. Такой показатель соответствует I классу качества воды, химический состав характеризуется как гидрокарбонатно-хлоридно-магниево-кальциевый. Реакция водной среды от нейтральной до слабощелочной, значения pH в интервале 7,6–7,8. Низкие значения

минерализации и благоприятный ионный состав (преобладание гидрокарбонатов и кальция) делают эти воды пригодными для орошения большинства сельскохозяйственных культур без дополнительных мелиоративных мероприятий.

КАРОС охватывает территорию Астраханской области и Республики Калмыкия. Водоснабжение системы ведется за счет ресурсов реки Волги. Мелиоративная инфраструктура КАРОС существенно изношена: фактический уровень физического износа составляет 91,23 %. В настоящее время ведутся работы по реконструкции и капитальному ремонту системы.

ПЕООС размещена в западной (степной) зоне Республики Калмыкия. Площадь земель, используемых в системе для орошения и обводнения, составляет 4,409 тыс. га. Ключевым источником водоснабжения выступает река Кубань. Годовой лимит водоподачи из внешних источников составляет 32,060 млн м³/год. Мелиоративная система характеризуется значительным физическим износом, уровень которого достигает 92,06 %. Структура водопользования в ПЕООС имеет специфику, на орошение направляется лишь 2,87 % воды, тогда как на обводнение пастбищ расходуется 22,37 %. Основная доля водных ресурсов (74,75 %) используется для прочих мелиоративных нужд.

Качество воды в системе характеризуется невысокой минерализацией и колеблется в пределах 0,218–0,350 г/л, что позволяет отнести ее к I классу качества. Химический состав – гидрокарбонатно-хлоридно-магниево-кальциевый, реакция среды – слабощелочная (pH 7,7–7,8). Сочетание низкой минерализации, высокого содержания гидрокарбонатов и кальция, а также низкой доли натрия определяет хорошую пригодность этих вод для орошения; риск осолонцевания и токсического воздействия на растения минимален.

КООС расположена на крайнем юго-востоке Республики Калмыкия на побережье Каспийского моря. Основными источниками водоснабжения системы служат река Бахтемир и Каспийское море. По данным на 1 января 2026 года, площадь земель, задействованных в КООС для орошения и обводнения, составила 1,119 тыс. га. Годовой лимит водоподачи из внешних источников равен 6,940 млн м³/год. При этом физический износ мелиоративной инфраструктуры достигает 86,08 %. Анализ структуры водопользования показывает, что расходуется на орошение 6,48 %, на обводнение пастбищ тратится 84,87 %, водопотребление на другие нужды составляет 8,65 %.

Минерализация вод КООС характеризуется неоднородностью. В водозаборе (река Бахтемир) минерализация составляет 0,287 г/л, а в распределительной сети (канал Каспийский) повышается до 0,415 г/л. При этом оба показателя соответствуют I классу

качества. Химический состав воды различается, в р. Бахтемир он гидрокарбонатно-хлоридно-магниево-кальциевый, в к. Каспийский – сульфатно-гидрокарбонатно-магниево-кальциевый. Реакция среды –слабощелочная (pH 7,7–7,8). Увеличение минерализации и изменение ионного состава в распределительной сети указывают на важность локального мониторинга качества воды при планировании орошения. При этом вода в водозаборе отличается благоприятными характеристиками и пригодна для сельскохозяйственного применения.

В таблице 3 приведены значения пяти ключевых показателей, рассчитанных по общепринятым методикам для оценки пригодности воды для орошения: показатель критического отношения ПКО (по И. Н. Антипову-Каратаеву и Г. М. Кадеру) отражает баланс катионов и позволяет судить о риске натриевого осолонцевания почв; индекс потенциальной солености PS (по L. D. Doneen) характеризует токсичность воды для корневой системы растений из-за присутствия хлоридов и сульфатов; соотношение адсорбции натрия SAR (по Л. А. Ричардсу) определяет вероятность ухудшения физических свойств почвы (структуры, водопроницаемости) при поливе; ирригационный коэффициент К (по Х. Стеблеру) дает интегральную оценку пригодности воды: чем выше значение, тем лучше качество воды для орошения.

Вода считается пригодной для орошения при значении показателя ПКО, равном или превышающем 0,23С: в таких условиях обеспечивается ионно-обменное равновесие с почвой при содержании натрия (Na^+) в почвенно-поглощающем комплексе (ППК) на уровне 10 % от ёмкости поглощения почвы. Если значение ПКО ниже указанного порога, вода признаётся непригодной для полива и требует улучшения качества. По данному критерию поливные воды, отобранные на начало поливного сезона по всем ООС, пригодны для орошения, так как значения ПКО существенно превышают порог 0,23С (табл. 3).

По величине PS оросительная вода PS < 3,0 относится к хорошему качеству, не создающая проблем засоления, PS > 5 неудовлетворительного качества, вызывает угнетение чувствительных культур, требуется промывной режим орошения. Воды из СООС, ПЕООС, КООС по показателю PS – хорошего качества, не создает проблем засоления при орошении. Вода ЧООС неудовлетворительного качества по риску засоления, где необходимы промывные поливы, контроль минерализации и работа дренажной сети. Оросительная вода по всем ООС с показателем SAR < 3, относится к высокому качеству, не представляет опасности для структуры почвы.

Таблица 3 - Значения показателей пригодности воды по различным методикам оценки на начало поливного сезона

Место отбора	Показатель критического отношения по И.Н. Антипову-Каратаеву и Г. М. Кадеру		Индекс потенциальной солености, L.D. Doneen	Соотношение адсорбции натрия по Л. А. Ричардсу	Ирригационный коэффициент Х. Стеблера
	$\frac{Ca^{2+}+Mg^{2+}}{Na^{+}}$	0,23С	$CI^{-}+\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	$\frac{Na^{+}}{\frac{\sqrt{Ca^{2+}+Mg^{2+}}}{2}}$	
Черноземельская обводнительно-оросительная система					
ЧМК	3,24	0,21	8,45	1,45	11,08
к. Гашунский распределитель	1,71	0,21	8,33	2,47	11,06
к. УС-5	1,95	0,25	9,75	2,41	9,60
Сарпинская обводнительно-оросительная система					
Волжская вода, ВР-1	42,00	0,07	1,55	0,07	44,31
к. Р-1	45,00	0,07	1,45	0,07	48,00
Право-Егорлыкская обводнительно-оросительная система					
к. РР-1	17,50	0,06	1,25	0,15	57,60
к. Леводжалгинский	30,00	0,05	0,85	0,08	96,00
к. Праводжалгинский	3,08	0,08	2,65	0,92	24,00
Каспийская обводнительно-оросительная система					
р. Бахтемир	8,75	0,07	0,85	0,30	96,00
к. Каспийский	3,21	0,10	2,15	0,93	41,14

Примечание: С- минерализация воды, г/л

Высокие значения ирригационного коэффициента (К>25) свидетельствуют о хорошем качестве воды, значение К 10–5 соответствует удовлетворительному качеству воды, требующему контроля уровня грунтовых вод. Поливные воды СООС, ПЕООС, КООС хорошего качества, риск негативных процессов в почве низкий. Воды ЧООС пониженного качества по риску засоления, требующие контроля.**Выводы**. В результате проведенного исследования установлено, что Республика Калмыкия испытывает острый дефицит водных ресурсов, что определяет необходимость привлекать воду из внешних источников. Качество оросительных вод демонстрирует различия между системами: воды Сарпинской, Право-Егорлыкской и Каспийской ООС соответствуют I классу качества, а воды Черноземельской ООС удовлетворительного качества с минерализацией II класса. Полученные результаты указывают на необходимость комплексного подхода к решению проблемы, включающего реконструкцию существующих систем, усиление контроля качества оросительных вод и разработку мер по предотвращению негативных процессов в почве для обеспечения эффективного сельскохозяйственного производства.

Список литературы

1. Исаева С.Д., Дедова Э.Б., Матвеев А.В. и др. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления мелиоративно-водохозяйственным комплексом: монография. – М.: ВНИИГиМ, 2024. 204 с.

2. Шевченко В.А., Бондарева Г.И., Дедова Э.Б. и др. Моделирование природно-техногенных процессов в мелиоративно-водохозяйственном комплексе: монография. – М.: ВНИИГиМ, 2025. 231 с.

3. Дедова Э.Б., Гольдварг Б.А., Цаган-Манджиев Н.Л. Деградация земель Республики Калмыкия: проблемы и пути их восстановления // Аридные экосистемы. – 2020. – № 2(83). С. 63–71.

4. Кизяев Б.М., Петрушкин Б.Ю., Адьяев С.Б. и др. Система рисоводства Республики Калмыкия: методическое пособие. –Элиста: ЗАОр «НПП Джангар», – 2009. 157 с.

5. Безднина С.Я. Научные основы оценки качества воды для орошения: монография. – Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ; ООО «Мещерский научно-технический центр», – 2013. 172 с.

6. Сенчуков Г.А., Гостищев В.Д., Воеводина Л.А., Мартынов Д.В. Оценка качества воды водных объектов, применяемых для наполнения и использования Чограйского водохранилища // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12, – № 1. С. 81–98.

7. Технико-эксплуатационная карта мелиоративной системы // Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга». URL: https: informraduga.ru/gts/93439 (дата обращения: 01. 06.2026).

8. Уланова С.С. Водные ресурсы Республики Калмыкия: современное состояние и использование // Экосистемы: экология и динамика. – 2023. – № 4. С. 29-58.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ДОНСКИХ ВОД ПРИ ИХ ПЕРЕБРОСКЕ В БЕРЕСЛАВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПО ОБВОДНИТЕЛЬНОМУ КАНАЛУ (2012-2023 ГГ.)

Торопов А. Ю., *Куприянов А.А.*
Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова», Волгоград

Аннотация: Статья посвящена изучению пространственно-временной изменчивости минерализации речного стока при поступлении в Береславское водохранилище. Материалами для исследования послужили выборка данных результатов анализов природных вод, отобранных из водозаборной зоны Береславского водохранилища и реки Дон. В результате проведения сравнительного анализа было установлено, что при переброске водных масс в Береславское водохранилище происходит рост концентрации главных ионов. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии сложившихся условий на процессы минерализации воды Береславского водохранилища в современный период.

Ключевые слова: минерализация речного стока, Береславское водохранилище, природные воды, сравнительный анализ, концентрация, главные ионы.

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF THE MINERALIZATION OF THE DON WATERS DURING THEIR TRANSFER TO THE BERESLAV RESERVOIR THROUGH THE IRRIGATION CANAL (2012-2023)

Toropov A. Yu., *Kupriyanov A.A.*
The All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture is a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center for Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov, Volgograd

Annotation: The article is devoted to the study of the spatio-temporal variability of river flow salinity when entering the Bereslav reservoir. The materials for the study were a sample of data from the results of analyses of natural waters taken from the water intake zone of the Bereslav reservoir and the Don River. As a result of the comparative analysis, it was found that during the transfer of water masses to the Bereslav reservoir, there is an increase in the concentration of main ions. The results obtained indicate the influence of the current conditions on the processes of water salinity of the Bereslav reservoir in the modern period.

Keywords: river runoff mineralization, Bereslav Reservoir, natural waters, comparative analysis, concentration, main ions

Введение

Наблюдение за качеством воды в трансграничных водных объектах и обмен сопоставимой информацией, характеризующей текущее состояние вод, является неотъемлемой частью межгосударственных отношений для обеспечения разумного и справедливого водопользования [4]. При этом уровень достоверности информации, которая поступает от национальных систем мониторинга, зависит от плотности сети и периодичности измерений с учётом основных гидрологических фаз [2]. Поэтому исследования должны проводиться не только в трансграничных створах водного объекта, а по всему речному бассейну, наиболее полно определяя состояние и тенденции качества вод на региональном и локальном уровне (в местах забора воды на производственные нужды). На сегодняшний день в числе главных последствий климатических перемен и техногенных преобразований является неблагоприятные изменения качества поверхностных вод. В перечне направлений изучения стока рек, особое значение уделяется процессам минерализации природной воды и её изменчивости на русловых участках под воздействием антропогенных и природных факторов.

В этой связи, нами проводились исследования на водохозяйственном комплексе (ВДСК), образованном в бассейне р. Дон, позволяющие в трансграничном аспекте взглянуть на проблему использования водных ресурсов в условиях сложившейся экосистемы и пространственной структуры почвенного покрова прилегающих агроландшафтов. Собранные данные вследствие длительного и непрерывного характера наблюдений за параметрами водной среды, могут служить для покрытия информационных потребностей, варьируя от конкретных, местных и детальных диагнозов до крупномасштабных индикаций.

Целью исследования является определение тенденций временной и пространственной изменчивости общей минерализации речного стока при снабжении для регулирования гидрологического режима Береславского водохранилища.

Материалы и методы исследования

Материалом для исследований являлись выборка данных результатов анализов природных вод, отобранных в полевых исследованиях с поверхностного горизонта 0,15-0,30 м водозаборной зоны в Береславском водохранилище в вегетационные сезоны 2012-2023 гг. В анализируемых образцах воды по общепринятым методам и нормативным методикам определяли фосфаты, нитраты, катионы и анионы (HCO_3^- ,Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, $Na+K^+$), реакцию среды (pH). Результаты анализов сопоставлялись нами со статистическими данными Росгидромета о химическом составе проб воды, отбираемых в течении года в реке Дон (поступающая вода) за тот же временной период [5]. Поскольку при выборке данных водные объекты имеют разные интервалы опробования, то для оценки концентраций макрокомпонентов в воде использовались как их минимальные и максимальные значения, так и средние величины минерализации воды.

Результаты и обсуждение

Основным источником наполнения Береславского водохранилища в период временной стабильности (летней навигации) и поддержания уровня (НПУ) является последовательная перекачка донской воды (рис. 1).



Рис. 1 - Водно-транспортная карта-схема донского склона ВДСК с расположением поста гидрохимических наблюдений в Береславском водохранилище

Многолетний период эксплуатации водохранилища с учетом антропогенных и климатических факторов вносит изменения происходящих в водоёме процессов, в результате которых определяется химический состав воды (макрокомпонентный) и, как следствие динамика минерализации поступающих в теплый период водных масс. Химический состав воды водохранилища сильно отличается от исходных речных вод не только минерализацией, но и концентрацией биогенных элементов присутствующих в различных формах (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика качественных показателей воды в водозаборной зоне Береславского вдхр. и р. Дон за период 2012-2023 г.

Водные объекты	Характеристики, показатели воды					
	минерализация, мг/дм^3	pH	фосфаты, мг/дм^3	нитраты, мг/дм^3	прогрев воды 20 ^{0}C и выше	площадь водосбора, тыс. км^2
р. Дон	558 – 711	7,4 – 8,2	0,061- 1,55	0,03 –14,9	один месяц (июль)	422
Насосная стан. Береслав-ского вдхр.	753 - 1079	7,3 – 8,5	0,06 – 6,24	0,06 –11,1	трехмесячный период (июнь-август)	26,8

Нарастание минерализации воды в чаше водохранилища связано с ростом, прежде всего легкорастворимых солей (Cl^-, SO_4^{2-}/ $Na+K^+$), они же и определяют химизм воды в летнюю межень. Из всего многообразия факторов, одним из основных процессов контролирующих содержание катионов и анионов в воде водохранилища является водная и ветровая эрозия почвенного покрова с повышением доли грунтового питания [1,3]. Наглядным примером этому служит рост минерализации воды в засушливые вегетационные сезоны.

Однако есть основания полагать, что столь высокое повышение минерализации обусловлено не только поступлением ионов с водосборной площади и разгрузкой подземных вод, но и химико-биологической метаморфизацией, за счёт интенсивности продукционно-деструкционных процессов, регулирующих содержание органического вещества. Все эти факторы повышают минерализацию воды в Береславском водохранилище, накладываясь друг на друга в вегетационный период, но относительный вклад каждого из них неодинаков.

При рассмотрении данных многолетних периодов минерализации воды важно уделить внимание хронологической изменчивости содержания главных ионов в воде речного стока и водозаборной зоны Береславского водохранилища. На рис. 2 представлен график, иллюстрирующий динамику содержания в воде основных ионов солевого комплекса в водных объектах по данным гидропостов за период с 2012 по 2023 г.

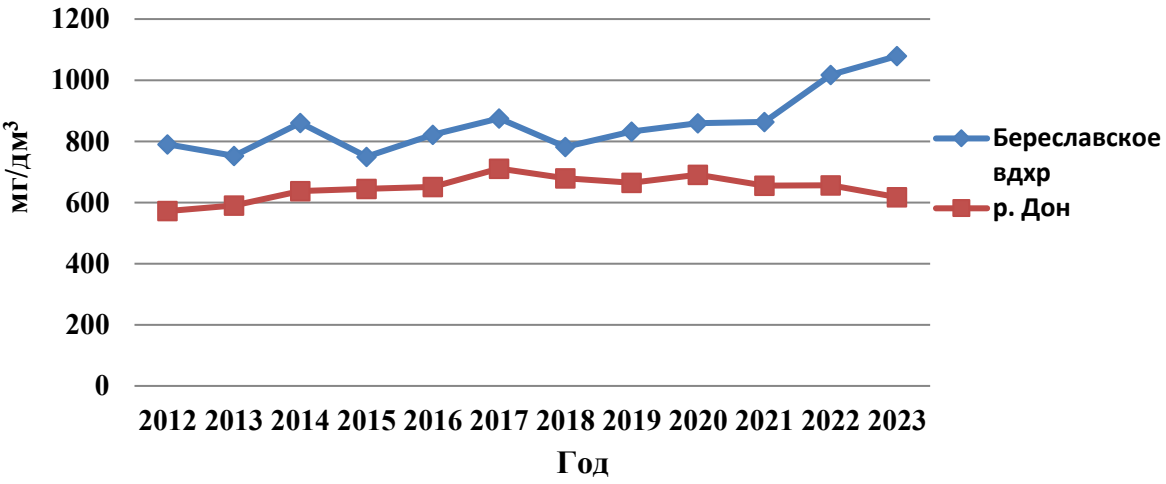


Рис. 2 - Хронологическая изменчивость минерализации воды в водозаборной зоне Береславского водохранилища относительно речного стока, мг/дм^3

Представленные результаты свидетельствуют о заметном увеличении минерализации на участке водозабора в Береславском водохранилище, чем питающие его речные воды. Если сравнивать динамику величин минерализации воды в водных объектах за период 2012-2018 г, то можно сказать об относительно сходных факторах, формирующих качество воды. Начиная с 2018 г. отмечается разнонаправленная динамика в характеристиках вод, что может свидетельствовать о нарастающем усилении факторов, оказывающих воздействие на поступление ионно-солевых компонентов в водохранилище. Напротив, в поступающих речных водах отмечается их уменьшение, что может быть связано с ослаблением условий влияющих на поступление компонентов в речной сток.

Заключение

Проведённое исследование пространственно-временной изменчивости минерализации воды Береславского водохранилища в современных условиях показал, что при поступлении речных вод, в той части водного объекта, где осуществляется водозабор, концентрация главных ионов под влиянием факторов увеличивается. Также, за рассматриваемый отрезок времени, в период наблюдений 2018 – 2023 г. установлено их относительное различие в направленности процессов воздействующих на содержание главных ионов в поверхностных водах водных объектов. Информация, полученная по ретроспективным данным крайне важна для статистической оценки качества воды с целью подготовки соответствующих мер для существующих или планируемых видов использования водных ресурсов.

Список литературы

1. Абдрахманов Р.Ф., Полева А.О., Валитов С.А. Формирование химического состава воды и донных отложений Павловского водохранилища // Геологический вестник. 2018. No 3. С. 12

2. Голубихина Ю.Б., Синильникова О.В., Дмитриенко Т.А., Поддуев В.Н., Денисенко С.П. / Мониторинг качества поверхностных трансграничных водных объектов бассейнов рек Днепр и Западная Двина по гидрохимическим и гидробиологическим показателям // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 4. С 82-92. DOI: 10.35567/19994508_2023_4_2.

3. Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б. Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности// Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 68-109. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-68-109.

4. Стратегический подход к мониторингу и оценке трансграничных рек, озер и подземных вод (обновленное издание) / ЕЭК ООН. Женева 2003. Веб-сайт: www.unece.org/env/water.

5. Качество поверхностных вод РФ / Ежегодник с приложением // Росгидромет, Ростов на Дону, 2012 – 2023 гг.

ЗАЩИТА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ - ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ ТУРКМЕНИСТАНА

Арзямова О.В., *Дурдыева О.П.*
НИПРЖМ Министерства охраны окружающей среды Туркменистана, г. Ашхабад,

Аннотация. В статье рассмотрены приоритетные направления в решении проблем водных источников Туркменистана по восстановлению пойм, экологической реабилитации водных объектов, лесовосстановлению в бассейнах трансграничных рек и др., а также способы борьбы с негативными явлениями, происходящими в результате изменения климата.

Ключевые слова: водные ресурсы, экосистемы, вторичное засоление, заболачивание, фитомелиорация.

PROTECTION OF WATER RESOURCES - A PRIORITY AREA OF STATE POLICY OF TURKMENISTAN

O.V. Arzyamova, Ph.D., O.P. Durdyeva
National Institute of Deserts, Flora and Fauna of the Ministry of Environmental Protection, Ashgabat, Turkmenistan.

Abstract: The article discusses priority areas in solving the problems of water sources in Turkmenistan for the restoration of floodplains, environmental rehabilitation of water bodies, reforestation in the basins of transboundary rivers, etc., as well as ways to combat negative phenomena resulting from climate change.

Keywords: water resources, ecosystems, secondary salinization, waterlogging, phytomelioration.

Прошло уже более полувека как воплотилась в жизнь вековая мечта туркмен о "большой воде". Строительство и эксплуатация Каракумского канала (ныне Каракум-река) кардинально изменили ландшафт Центральной Азии. Начиная с 1958 г. на целинных землях были созданы крупные хлопководческие совхозы, к началу 1968 г. оросили уже более 200 тыс. га земель. Туркмены радовались приходу воды в пустыню, однако на сегодняшний день страна столкнулись с экологическими последствиями этого гидротехнического сооружения, которые проявляются в глобальном масштабе, затрагивая климат, почву и биоразнообразие региона.

Ежегодно канал забирает из Амударьи до 12–13 км^3 воды, что послужило одним из факторов высыхания Аральского моря, поднятия пыльных и соляных бурь с его дна. Воды фильтруясь сквозь песчаное дно канала вызвали резкий подъем уровня минерализованных грунтовых вод, из-за чего прилегающие плодородные земли покрываются соляной коркой и выводятся из сельхоз оборота. Вдоль трассы канала и на окраинах орошаемых оазисов образовались обширные подтопленные зоны и искусственные озера-отстойники (култуки). Вода в них быстро испаряется, оставляя после себя безжизненные солончаки. Изменение гидрологического режима Амударьи привело к гибели уникальных тугайных лесов в ее пойме. Исчезают многие виды местных рыб, птиц и животных, приспособленных к естественному току реки.

Приоритетными направлениями решения этих задач в настоящее время являются: восстановление пойм, экологическая реабилитация водных объектов, лесовосстановление в бассейнах трансграничных рек и др. Хотелось бы остановиться более подробно на лесовосстановлении в речных бассейнах Туркменистана, которое направлено на борьбу с опустыниванием и сохранением уникальных экосистем. Основные мероприятия реализуются в руслах ключевых водных артерий: Амударья, Мургаб, Теджен и Атрек. Главный упор делается на возрождение пойменных лесов — тугаев, создании защитных лесополос вдоль водоемов и каналов, фитомелиорации и закреплению берегов. В условиях засушливого климата, высоких температур и сильного испарения в Туркменистане к укреплению берегов предъявляются особые требования. Растения должны быть не просто влаголюбивыми, но также солеустойчивыми (галофитами) и способными выдерживать резкие колебания температуры воздуха и уровня воды. По результатам многолетних фундаментальных исследований ученых Института пустынь наиболее перспективными растениями – закрепителями береговой линии являются: ива туркестанская *(Salix turkestanica)*, каспийская *(S.caspica)* и др. Эти растения быстро укореняются прямо в воде и влажном грунте, формируя густой подземный войлок. Виды рода тамарикс *(Tamarix)* - уникальные кустарники галофиты,

обладают мощнейшими корнями, скрепляющими подвижные берега солоноватых коллекторов и рек. Тут или шелковица (*Morus*) – обычно высаживается вдоль оросительных сетей и Каракумского канала, ее корни глубоко связывают грунт дамб и защищают каналы от деформации. Лох *(Elaeagnus)* - выдерживает сильное засоление почв и временную засуху, создает плотную прибрежную полосу тугайного типа. Клен туркменский (*Acer turcomanicum)* и каркас кавказский *(Celtis caucasica)* - рекомендуется для посадок по берегам водохранилищ и в деградированных селевых руслах предгорий Копетдага. Среди травянистых растений и полукустарников предпочтение отдается следующим растениям: тростник южный *(Phragmites australis),* рогоз *(Typha),* камыш *(Phragmites)* - закрепляют кромку воды и мелководье, гасят волновую нагрузку и снижают скорость прибрежного течения; чингиль ***(****Halimodendron****)*** - колючий кустарник, растущий по берегам, отлично сдерживает осыпание сухих откосов [1,5]. Растения – фитомелиоранты используются для повышения плодородия засоленных земель, и среди них особую роль играют виды из родов: *Salsola, Climacoptera, Atriplex, Suaeda, Haloxylon, Halostaschys, Ceratoides, Koshia, Artemisia, Halocharis, Halothamnus, Aeliropus* и др., произрастающие на солончаках и такырах Туркменистана [2,4,5]. Для восстановления вышедших из сельхозоборота засоленных почв предпочтение отдается бобовым культурам: люцерне *(Medicago),* клеверу *(Trifolium)*, а также чередованию основных посевных сельскохозяйственных культур.

Масштабное орошение пахотных земель приводило к накоплению сильно минерализованных грунтовых вод, которые сбрасывались в Амударью, а незначительная часть отводилась в естественные понижения, что влияло на качество амударьинской воды в среднем и нижнем течениях реки, повышая ее минерализацию. В других районах коллекторно-дренажные стоки отводились в понижения Каракумской пустыни, где затапливали пастбищные земли, сокращая их площади и продуктивность. Чтобы спасти угодья от заболачивания и засоления, требовалось отвести эти воды за пределы оазисов, тогда и появилась идея создания озера «Алтын асыр» в Центральных Каракумах. Главной задачей этого проекта явилось предотвращение загрязнения трансграничных рек. Целью - собрать минерализованные коллекторно-дренажные воды (КДВ) с орошаемых территорий. Ожидаемым результатом является улучшение структуры почв, снижение загрязнения водных ресурсов. Таким образом появится возможность избавиться от подтопления орошаемых земель и пустынных пастбищ, вернуть в оборот огромные массивы используемых территорий, увеличить биоразнообразие животного и растительного мира, и улучшить экологическую обстановку. Предусматривается также повторное использование отводимых дренажных вод на нужды отгонного

животноводства в целях увеличения их продуктивности и на заготовку страховых запасов кормов [3]. Беспрецедентный по своим масштабам проект, реализация которого находится под пристальным вниманием лидера нации, имеет огромное значение не только для Туркменистана, но и для Приаралья.

Туркменское озеро «Алтын асыр», для сбора КДВ, создается на базе естественного понижения Карашор, расположенного на северо-западе страны, в пределах южного Устюрта. Озеро должно принять КДВ по двум системам подводящих коллекторов северного и южного. Северная система находится на Сарыкамышско-Хорезмской низменности, а южная – на территории Каракумов. Первая – отведет воды с орошаемых земель Дашогузского велаята. Вторая - с орошаемых земель по Главному коллектору, объединяющему дренажные системы Лебапского, Марыйского и Ахалского велаятов (рис.1). Общая протяженность коллекторов, по которым собираются дренажные воды составляет 2,7 тыс. км.

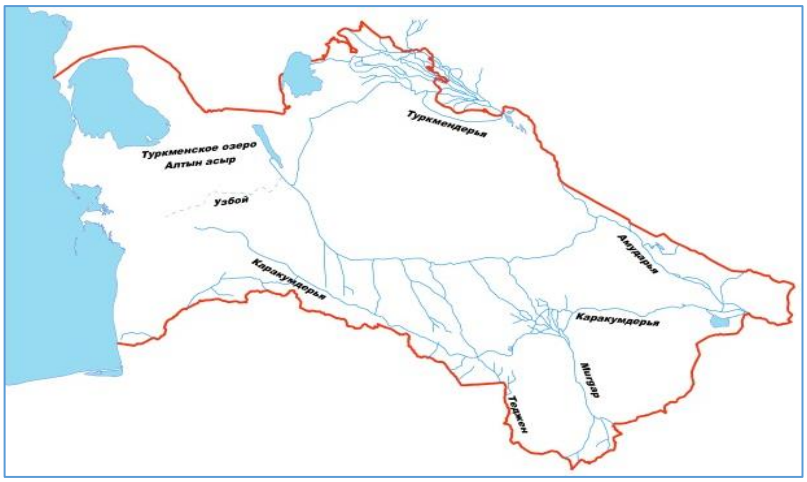


Рис.1. Карта-схема трансграничных рек и системы КВД Туркменистана

С помощью растений-галофитов, приспособленных к условиям засоления, а также поглощению солей, и других вредных веществ, наряду с использованием новейших технологий, открываются возможности биологической очистки коллекторных вод и вводу их в эксплуатацию. Для закрепления береговой линии предусматривается посадка саксаула и солянок вдоль главных коллекторов. Высшие водные растения обеспечивают борьбу с зарастанием водоемов вредной растительностью. Таким образом большая часть воды становится пригодной для технических нужд, пастбищного хозяйства, животноводства, рыболовства. Этот метод утилизации коллекторно-дренажных вод наиболее безопасен для экосистем пустыни, включая и те ее регионы, где пролегли новые рукотворные реки.

Уже сегодня функционирование образовавшихся водоемов позволило использовать их для развития рыбного промысла, привлечения перелетных птиц. На обширной территории Центральных Каракумов, охватывающей в том числе и зону отвода вод для главного туркменского коллектора создана новая заповедная зона «Берекетли Гарагум» для изучения экосистем, восстановления пастбищ и контроля за влиянием сброса этих минерализованных вод на гидрогеологию, изменение ландшафта, флору и фауну пустыни. Появление инфраструктуры в зоне этого заповедника, строительство дорог, населенных пунктов, социальных объектов позволило оживить некогда безмолвные пустынные территории.

Благодаря строительству нового озера создается страховой запас воды. В результате естественной природной фильтрации и применению современных технологий ее можно будет рационально использовать в нуждах сельскохозяйственного комплекса, а также освоения новых земель, расширения пастбищных площадей, полива зеленых насаждений, технических нужд и т.д. В целях рационального использования водных ресурсов все шире применяются водосберегающие технологии, в том числе капельное орошение и другие прогрессивные методы полива. В этой связи принимаются комплексные меры по коренному улучшению мелиоративного состояния земель, увеличению числа источников влаги, строительству новых, более мощных современных гидромелиоративных сооружений. И что особенно важно исключить сброс вредных дренажных вод обратно в русло Амударьи и других естественных водных источников.

Таким образом, защита водных ресурсов Туркменистана — это стратегическая задача нашего государства. Законодательством предусмотрен водный кодекс, который регулирует вопросы охраны вод от загрязнения и истощения, устанавливая строгие нормы для физических и юридических лиц. Главные усилия сосредоточены на бережном потреблении воды в сельском хозяйстве и предотвращении загрязнения рек и морских вод. Разработаны и действуют строгие нормативы, в том числе правила охраны прибрежных вод от загрязнения, направленные на защиту туркменского сектора Каспийского моря. На региональном уровне предусматривается рациональное использование водных ресурсов, внедрение капельного орошения, бетонирование русел каналов (включая Каракумский канал) для сокращения фильтрационных потерь, а также очистка сточных вод, строительство современных водоочистных сооружений, станций аэрации и опреснительных установок в прибрежных регионах для повторного использования коллекторно-дренажных вод.

Туркменистан является активным участником международного диалога в области использования и сохранения водных ресурсов, последовательно наращивая

международное научное сотрудничество в этой сфере. Ратифицировав основополагающие природоохранные соглашения ООН, в том числе Конвенции о биологическом разнообразии, охране озонового слоя, охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, Рамсарскую конвенцию о водно-болотных угодьях, Конвенцию по борьбе с опустыниванием, Конвенцию об охране всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО и другие, наша страна неукоснительно соблюдает взятые на себя обязательства.

Список литературы

1. Бабаев А.Г. «Оазисные пески Туркменистана и пути их освоения» Ашхабад, издательство «Ылым», 1973 г., 353 с.
2. Дурдыев Б., Аннаниязов К, Арзямова О. Цифровая система освоения засоленных земель в Туркменистане. Ашхабад, издательство «Ылым», 2023 г., 129 с.
3. Кепбанов П.А., Павленко А.В., Дурдыева О.П., Сахатова М.О. Пастбища окрестностей собирательного коллектора Туркменского озера «Алтын асыр». Ашхабад – 2023 г., 47 с.
4. Нечаева Н.Т., Антонова К.Г., и др. Продуктивность растительности Центральных Кара-Кумов в связи с различным режимом использования. М., 1979 г., 256 с.
5. Овезлиев А.О., Добрин Л.Г., Каленова Г.С. и О.Р. Курбанов «Фитомелиорация пустынь Туркменистана» Ашхабад, издательство «Ылым», 1979 г., 195 с.

Экономика природопользования: стратегия и инновации

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ДАННЫХ КАК СРЕДСТВО ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СФЕРЕ (НА ПРИМЕРЕ СТЕПНЫХ РЕК МЕЖДУРЕЧЬЯ КУБАНИ И ДОНА)

Землянов И.В., *Савельев Ф.Е., Коновалов М.Л., Кудряшов С.А., Ермакова Г.С., Рыбина Е.Ю., Турсунова Г.Ш.*
Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия
e-mail: ivz@geocentre.ru

Аннотация: Представлен подход к организации комплекса работ по обоснованию и разработке Программы водохозяйственных мероприятий, опирающейся на современные принципы цифровизации. Разработана ГИС БД на базе ГИС «Аксиома» и СУБД Postgres с расширением PostGIS, программа реализована на примере степных рек Краснодарского края междуречья Кубани и Дона. В состав базы данных входят более сотни векторных и растровых слоёв, включая архивные материалы, полевые данные, результаты дешифрирования ДДЗЗ и гидродинамического моделирования. Все данные имеют строгую геопривязку, что обеспечивает наглядную визуализацию и совместный геопространственный анализ разнородной информации. Функционал БД предполагает возможность комплексного подхода к решению водохозяйственных и экологических задач.

Ключевые слова: междуречье Кубани и Дона, цифровизация, база данных, ГИС, экология, водное хозяйство

A SPECIALIZED GEOINFORMATION DATABASE AS A DECISION SUPPORT TOOL IN WATER MANAGEMENT (ON THE EXAMPLE OF STEPPE RIVERS OF THE KUBAN–DON INTERFLUVE).

Zemlyanov I.V., *Savelev Ph.E., Konovalov M.L., Kudryashov S.A., Ermakova G.S, Rybina E.Yu., Tursunova G.Sh.*
Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia
e-mail: ivz@geocentre.ru

Abstract: The paper presents an approach to organizing a comprehensive set of works aimed at developing a Water Management Program based on modern digitalization principles. A GIS database has been developed using the Axioma GIS platform and the Postgres DBMS with the PostGIS extension; the program has been implemented on the example of steppe rivers in the Kuban–Don interfluve within Krasnodar region. The database comprises over a hundred vector and raster layers, including archival materials, field data, remote sensing data and hydrodynamic modeling results. All data are strictly georeferenced, enabling clear visualization and integrated spatial analysis of heterogeneous information. The database functionality supports a comprehensive approach to addressing water management and environmental challenges
Keywords: Kuban–Don interfluve, digitalization, database, GIS, environment, water management

Введение

В современной системе управления водными ресурсами все более отчетливо прослеживается формирование рациональной последовательности действий при обосновании необходимости финансирования мероприятий по восстановлению водных объектов. Ключевая роль в этом процессе отводится субъектам Российской Федерации, которые непосредственно заинтересованы в улучшении экологического состояния своих водных артерий.

Первым этапом данной последовательности становится выполнение регионами комплекса подготовительных работ, направленных на создание научно обоснованной программы мероприятий. В рамках подготовки программы проводятся масштабные комплексные обследования состояния водных объектов, что позволяет дать объективную картину экологического благополучия или неблагополучия.

На основе полученных данных определяется очередность вовлечения водных объектов в работы по экологической реабилитации. При этом учитывается степень деградации, социально-экономическая значимость объекта, а также ожидаемая эффективность мероприятий. Стандартизованная процедура ранжирования позволяет сделать обоснованный выбор и сконцентрировать ресурсы на наиболее проблемных или важных водных объектах.

Сегодня становится очевидным, что эффективное управление процессом планирования и реализации комплекса водохозяйственных мероприятий невозможно без перехода к новым технологическим платформам, важнейшей из которых является

создание цифрового двойника территории – информационной основы планирования и реализации мероприятий, направленных на восстановление экологического состояния водных объектов и их рациональное использование.

На примере степных рек междуречья Кубани и Дона представлен подход к организации комплекса работ по обоснованию и разработке Программы водохозяйственных мероприятий для восстановления экологического состояния водных объектов, опирающийся на современные принципы цифровизации. Ключевая роль в этом подходе отведена специализированной геоинформационной базе данных (ГИС БД), которая реализует двойную функцию: служит одновременно инструментом планирования, контроля и управления процессом работ (от полевых обследований до моделирования и выбора решений) и итоговым хранилищем всех пространственных и атрибутивных материалов, гарантируя их непротиворечивость и стандартизацию.

Предлагаемый подход, основанный на принципах цифрового управления работами по оценке состояния водно-экологического каркаса обследуемой территории – сбору пространственных данных и планированию системы мероприятий по управлению водными объектами, предусматривает пять последовательных этапов – сбор и анализ исходных данных, экспедиционные исследования, гидродинамическое и водохозяйственное моделирование, формирование и ранжирование мероприятий, создание итоговой ГИС БД. По завершении проекта итоговая база становится фундаментом для долгосрочного мониторинга, сценарного прогнозирования и создания цифрового двойника водно-экологического каркаса территории, а также может быть передана региональным органам управления водными ресурсами в качестве готового аналитического продукта для обоснования приоритетных природоохранных мероприятий.

Постановка задачи. Общее описание проблемы

Проект реализован на примере степных рек междуречья Кубани и Дона – Ея, Албаши, Ясени, Челбас, Бейсуг, Кирпили и Понура. Текущее экологическое состояние водных объектов в бассейнах этих рек характеризуется высокой степенью неблагополучия [1-5]. Для данного региона выделяется целый комплекс экологических проблем, среди которых маловодность, деградация гидрографической сети, истощение и обмеление водных объектов, загрязнение и нарушение нормативов качества вод, зарастание водных объектов и их берегов растительностью, сильное заиление водных объектов, эвтрофирование, случаи заморов. Все эти процессы взаимосвязаны и зачастую усиливают друг друга, многократно повышая негативный эффект.

Причиной неблагополучного состояния является комплекс природных и антропогенных факторов. Изначально маловодность рек обусловлена климатическими факторами. Засушливость климата и температурный режим обусловливает наличие сезонов с пониженным увлажнением и, как следствие, пониженным стоком. Наблюдающиеся климатические тренды позволяют говорить об увеличении засушливости климата региона. Это является базовой причиной маловодности рек рассматриваемой территории [3-5].

Поверх этого накладывается ряд антропогенных факторов, которые в значительной мере усугубляют ситуацию, усиливая негативные проявления, связанные с малой водообеспеченностью региона, и являются причиной дополнительных неблагоприятных явлений. Главными антропогенными факторами являются высокая степень трансформации гидрографической сети и антропогенная нагрузка на водосборе.

Большое количество руслоперегораживающих сооружений (РПС) в данном регионе приводит к значительной трансформации гидрографической сети. Результаты инвентаризации РПС, выполненные в рамках проекта, показали, что в среднем по территории РПС пересекают русла рек, балок и других водотоков через каждые 2 км гидрографической сети, а в отдельных бассейнах – через каждые 1-1,5 км. Дамбы, расположенные в руслах рек и балок, превращают их из водотоков в каскады прудов, что приводит к формированию участков пониженного водообмена, увеличению потерь воды на испарение за счет формирования дополнительного водного зеркала, а при неудачно спроектированных водопропускных сооружениях – к нарушению гидравлической связи и отсутствию перетока между прудами в маловодные периоды. Замедленный водообмен прудов способствует интенсификации процессов заиления. Заиление в свою очередь ведет к уменьшению глубин, что способствует активному развитию водной растительности, которая, отмирая, остается разлагаться в прудах, тем самым еще усиливая процесс заиления.

Другим значимым фактором неблагоприятного экологического состояния водных объектов является антропогенное освоение водосбора, которое в данном регионе представлено в основном сельскохозяйственной и селитебной нагрузкой, в частности высокой степенью распашки и большой плотностью населенных пунктов, не оборудованных системами канализации.

По общим оценкам, средняя доля распаханных участков на рассматриваемой территории составляет порядка 80%. Отмечается достаточно высокий процент распашки не только водосбора в целом, но и охранных зон водных объектов – до 40% в ВЗ и 20% в ПЗП. Высокая степень распаханности может быть причиной повышенного

поступления в водные объекты биогенных веществ, пестицидов и взвешенных веществ за счет плоскостного смыва с обработанных полей. Помимо распашки, сельскохозяйственная нагрузка представлена множеством мелких объектов животноводческой отрасли, стоки с которых также могут быть источником загрязнения вод биогенными и органическими веществами.

Неблагоприятный эффект от селитебной нагрузки проявляется в основном в большой плотности сельских населенных пунктов, не оборудованных системами канализации. Селитебные зоны, значительная доля которых попадает в границы ВЗ и ПЗП, по большей части представлены частным сектором с жилой застройкой с сопутствующими огородами и частными хозяйствами и могут быть источником диффузного загрязнения водных объектов.

Антропогенное загрязнение водных объектов отходами сельского хозяйства и бытовыми стоками с селитебных территорий, как правило, вызывает обогащение воды биогенными элементами (азотом, фосфором), органическими веществами, взвешенными веществами и пестицидами. Это, во-первых, усугубляет процессы заиления, а, во-вторых, может провоцировать и усиливать процессы эвтрофирования [6, 7]. Повышенная биогенная нагрузка приводит к массовому развитию водной растительности и сопутствующей биоты, «цветению» воды (массовому размножению водорослей). Развитие токсичных видов водорослей может приводить к заморам рыбы и гибели представителей околоводной фауны. Массовое отмирание представителей водной биоты приводит к активизации процессов гниения, уменьшению содержания кислорода в воде, заилению [6, 7]. Все это способствует ускорению деградации водных объектов, что усугубляется медленным водообменом ввиду наличия большого количества дамб, препятствующих вымыванию иловых отложений из водных объектов.

Вследствие воздействия перечисленных антропогенных факторов водные объекты региона испытывают значительную нагрузку. Учитывая, что многие системы прудов существуют на рассматриваемых реках уже более 70 лет, а аграрное освоение региона насчитывает более 100 лет, то суммарный накопленный отрицательный эффект оказывается весьма существенным, что и приводит к текущему неблагополучному состоянию водных объектов, что еще больше усугубляется их размерами. Рассматриваемые реки относятся к категории средних и малых, а потому более уязвимы к внешним воздействиям – имеют меньший «запас прочности» и способность к самовосстановлению.

Подходы к решению проблемы

Для решения обозначенной проблемы требуется взвешенный подход, опирающийся на современные технологии и методологическую комплексность и гибкость. Реализация проекта предполагает последовательное выполнение 5 этапов работ, на каждом из которых осуществляется сбор, обработка и представление в цифровом виде больших объемов пространственной информации, в результате чего формируется единая геоинформационная база данных, которая одновременно является справочным ресурсом и инструментом планирования водохозяйственной деятельности.

На *первом, камеральном, этапе* выполняется сбор, анализ и обобщение полного набора информации, характеризующей исследуемую территорию и находящиеся в её пределах водные объекты. На этом этапе среди прочего анализируются материалы предшествующих научных и проектных работ, картографические материалы, сведения о водных объектах, гидрометеорологическая и картографическая изученность региона, метеорологические, гидрологические и гидрохимические данные, информация об экологическом состоянии водных объектов, данные о хозяйственном освоении водосбора и антропогенной нагрузке, сведения о водохозяйственной инфраструктуре и системе водопользования, сведения из ЕГРН о зонах с особыми условиями использования территории – водоохранных зонах (ВЗ), прибрежных защитных полос (ПЗП) и зонах затопления и подтопления, данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ).

На основе полученных результатов формулируются предварительные выводы о состоянии водных объектов, выявляются возможные причины их деградации и составляется программа экспедиционных исследований.

На *втором этапе* в целях получения актуальной (полевой) информации о состоянии водных объектов в пределах исследуемой территории для верификации и дополнения камеральных данных проводится комплекс экспедиционных работ. В процессе полевых работ осуществляется обследование водных объектов, включая визуальный осмотр, оценку степени заиления, зарастания, нарушения режима водообмена, наличия визуальных признаков неблагополучия, сбор количественных данных о состоянии водных объектов на основе инструментальных экспресс-оценок, отбор проб воды и донных отложений и проведение их химического анализа. Помимо этого проводится анализ состояния территорий, прилегающих к водным объектам, с целью дать характеристику степени антропогенной нагрузки и выявить факты нарушения режима использования ВЗ и ПЗП, обследование существующих гидротехнических сооружений, их технического и эксплуатационного состояния, а также сбор калибровочных данных для последующей верификации информации, полученной в результате дешифрирования ДДЗЗ.

Этап полевых работ представляется одним из наиболее важных источников получения актуальной информации о состоянии водосборных территорий, водных объектов и гидротехнических сооружений, по итогам которых можно составить ранжированный перечень участков, нуждающихся в реализации мероприятий.

На *третьем этапе* реализуется комплексное гидродинамическое и водохозяйственное моделирование. На базе интегрированных полевых и камеральных (цифровые модели рельефа, ДДЗЗ, сведения о водопользовании, гидрологические расчеты) данных выполняется моделирование гидрологических процессов и водохозяйственных ситуаций для лет различной обеспеченности по водности. В ходе моделирования производится количественная оценка пространственно-временной изменчивости уровней и расходов воды на исследуемых участках водных объектов, прогноз развития паводков, пересыхания или обмеления, анализ влияния существующих и проектируемых сооружений на гидрологический режим, перспективные расчеты по изменению гидрологических условий в случае реализации предлагаемых мероприятий.

Таким образом, на третьем этапе на основе имеющихся данных формируется набор численных инструментов, позволяющих прогнозировать поведение водной системы в случае реализации конкретных мероприятий. Полученная в результате серии сценарных расчетов информация позволяет оценивать эффект от водохозяйственных мероприятий и служит основой для принятия управленческих решений.

На *четвертом этапе* происходит формирование и ранжирование итогового перечня водохозяйственных мероприятий. Составляется перечень приоритетных мероприятий по экологической реабилитации, проводится предварительная оценка необходимого объёма инвестиций.

На *пятом этапе* происходит наполнение итоговой специализированной геоинформационной базы данных. Все собранные на камеральном и полевом этапах материалы и результаты моделирования интегрируются в единую географическую информационную систему.

Архитектура и функционал специализированной геоинформационной базы данных

Созданный рабочий проект – специализированная геоинформационная база данных – сочетает в себе функционал геоинформационных систем (ГИС) и систем управления базами данных (СУБД). Проект состоит из трех частей:

– основной рабочий инструмент, написанный на языке Python и поставляемый в виде модуля для ГИС «Аксиома» [8];

– база данных, созданная в PostgreSQL [9];

– каталог данных – данные, хранящихся в виде файлов на внешнем сервере.

Дополнительно, в проект интегрирована опция по работе со службой публикации геоданных – Geoserver, которая поставляется в виде Docker контейнера и, используя стандарт WMS, отвечает в проекте за отображение локальной базовой карты.

Созданный на основе объединения нескольких программных продуктов, итоговый проект обладает преимуществом комплексности – обеспечивает соединение в одной рабочей среде возможностей геопространственного анализа ГИС с системой хранения больших массивов данных, а также расширенным прикладным аналитическим функционалом, обеспечиваемым дополнительным программным модулем.

Для удобства использования программного продукта в региональных органах власти в проекте предусмотрена возможность многопользовательского режима. Благодаря использованным системным решениям все специалисты, задействованные в решении вопросов экологии и водного хозяйства, в процессе работы имеют одновременный доступ к актуальной версии базы данных, при этом предусмотрено разграничение настроек доступа и возможностей пользователей. Пользователю с функцией администратора предоставляются расширенные возможности – не только просмотр, но и редакция и добавление новых данных в базу. Прочим пользователям предоставлена возможность только просмотра, доступ к внесению изменений ограничен.

Все собранные в ходе выполнения работ материалы и данные интегрированы в ГИС среду. Проект содержит как базовую географическую информацию о регионе, так и специальные данные – векторные и растровые слои информации, которые всесторонне отражают гидрографию, экологию, антропогенную нагрузку и состояние водохозяйственного комплекса в рассматриваемом регионе, а также результаты полевых обследований, дешифрирования ДДЗЗ и выполненных модельных расчетов.

Векторные данные хранятся в базе данных, которая развернута на СУБД PostgreSQL с использованием расширения PostGIS. На внешнем файловом сервере находится каталог данных, где в виде отдельных файлов хранятся только растровые слои и внешние файлы (фото- и видеоматериалы, графические материалы, документы в форматах jpg, avi, pdf, docx, html). В свою очередь, ссылки с путями на данные каталога хранятся в базе данных для предоставления удобного доступа к ним из ГИС.

Интеграция базы данных из СУБД в ГИС-среду осуществляется с помощью основного инструмента, выполненного в виде плагина для ГИС «Аксиома». Помимо связующей функции плагин – это, в первую очередь, основной рабочий инструмент для работы с разнородными данными с удобным пользовательским интерфейсом.

Рабочий интерфейс проекта представлен на рисунке 1. Проект разворачивается непосредственно в рабочем окне ГИС «Аксиома» (зеленый цвет на рисунке 1). В расположенном справа окне представлены элементы управления основного рабочего инструмента (красный цвет на рис. 1).

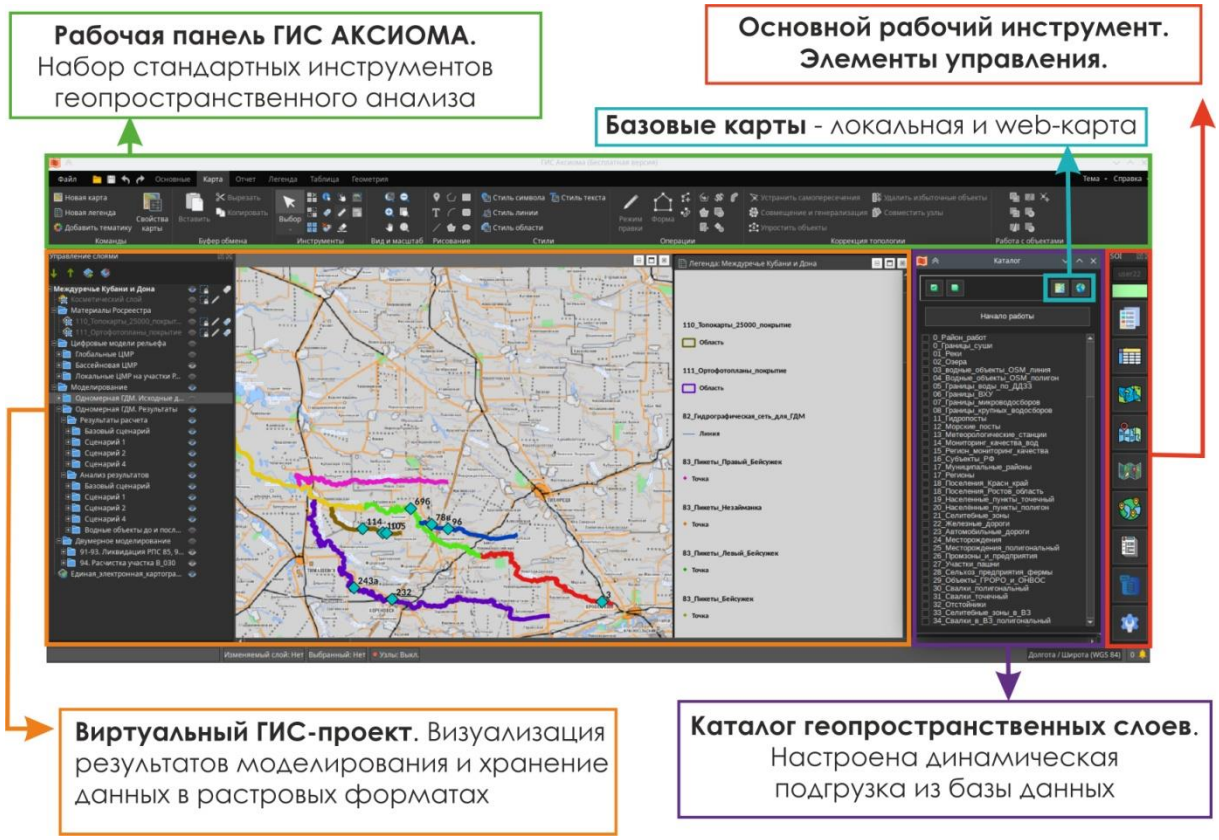


Рис. 1 – Архитектура проекта. Структура и интерфейс специализированной геоинформационной базы данных

Все векторные данные доступны из интерфейса проекта посредством функции Каталога (фиолетовый цвет на рисунке 1). Из Каталога также настроена функция запуска базовых карт (голубой цвет на рисунке 1). Оттуда же кнопкой «Начало работы» загружается базовый пользовательский ГИС-проект (оранжевый цвет на рис. 1).

Базовый пользовательский ГИС-проект содержит растровые слои и весь комплекс материалов гидродинамического и водохозяйственного моделирования – как исходных данных для моделей, так и всех полученных результатов сценарных расчетов.

Основной рабочий инструмент проекта (плагин ГИС «Аксиома») в совокупности со стандартными возможностями ГИС «Аксиома» позволяет в удобной для пользователя форме напрямую из ГИС:

– осуществлять динамическую подгрузку геопространственных слоев, хранящихся в базе данных, минуя обычные для ГИС «Аксиомы» внешние файлы формата tab;

– открывать внешние файлы (форматов jpg, avi, pdf, docx, html), хранящиеся на внешнем сервере, по ссылкам из соответствующих геопространственных слоев;
– подгружать базовый пользовательский ГИС-проект, формируемый динамически, минуя обычные для ГИС «Аксиомы» внешние файлы формата mws;
– подключать базовые карты из интернета;
– подключать локальную базовую карту, размещенную на локальном сервере публикации геоданных (Geoserver);
– для наиболее значимых геопростанственных слоев открывать таблицы базы данных и использовать непосредственно в ГИС-среде дополнительный аналитический функционал, предусмотренный возможностями СУБД и основного рабочего инструмента.

Преимуществом выбранной организации системы хранения информации является то, что максимально возможное количество информации собрано внутри базы данных. При накопленных объемах геопространственных данных, загрузка слоев ГИС-проекта из внешних файлов привела бы к избыточной нагрузке на дисковую подсистему файлового хранилища, на котором размещены данные файлы (открывание сотен маленьких файлов, умноженное на количество клиентов), а также к избыточной нагрузке на локальную вычислительную сеть, связывающую клиентов с сервером. Оба эти фактора влекут кратное увеличение времени загрузки проекта, что негативно отразилось бы на пользовательском опыте при работе с проектом. Между тем, загрузка напрямую из базы данных максимально оптимизирует работу проекта – увеличивает скорость его загрузки, также снижает нагрузку на пользовательские рабочие места в части обращения к их дисковой подсистеме.

Работа в проекте осуществляется на базовой региональной карте, которая обеспечивает стандартную базовую подложку – наборы данных о гидрографии, землепользовании, населенных пунктах, дорогах, административных границах. Базовые карты реализованы в проекте в двух вариантах – web и локальная. Сама ГИС Аксиома предполагает возможность подключения к широкому набору онлайн базовых карт – Яндекс, OSM, ЕЭКО, Кадастровая карта, Bing, Google и др. В качестве основной в проекте принята карта ЕЭКО – единой электронной картографической основы Росреестра. Однако для удобства пользователей создана дополнительная – локальная – базовая карта. Карта собрана из базовых слоев OSM и размещена на локальном сервере публикации геоданных (Geoserver), являющемся важной частью проекта,

обеспечивающим автономность работы при отсутствии доступа во внешнюю сеть Internet.

Панель основного рабочего инструмента (красная рамка на рисунке 1) позволяет запускать напрямую из базы данных основные рабочие таблицы проекта – таблицы водохозяйственных мероприятий, водных объектов, руслоперегораживающих сооружений, водопользователей и результатов полевых обследований. Между таблицами настроены активные перекрестные ссылки, существует возможность сортировки и фильтрации информации, выборочного вывода объектов на карте по специальным запросам, также предусмотрена возможность редактирования данных в удобной для пользователя форме. По ссылкам из таблиц доступны внешние документы – договоры водопользования, акты полевых обследований водных объектов и инвентаризации гидротехнических сооружений, протоколы лабораторных исследований проб воды и грунта, фотоматериалы.

Разработанный инструмент позволяет осуществлять наглядную визуализацию и совместный геопространственный анализ широкого спектра разнородной информации, выявлять уязвимости, формулировать решения, ранжировать проблемы по степени значимости, выявлять первоочередные и второстепенные задачи, при этом обеспечивая напрямую из ГИС доступ к обширной водохозяйственной документации. Соединение возможностей ГИС и БД в рамках единого информационного проекта обеспечивает надежную поддержку принятия решений в экологической и водохозяйственной сфере.

Заключение

Для решения водохозяйственных и экологических проблем в бассейнах степных рек междуречья Кубани и Дона проведен комплекс исследовательских работ, по результатам которого создана специализированная геоинформационная база данных с расширенным функционалом. Созданный продукт интегрирует в единой рабочей ГИС-среде данные о гидрографической сети и водопользователях, результаты полевых обследований водных объектов и гидротехнических сооружений, дешифрирования данных дистанционного зондирования, гидродинамического моделирования, архивные данные, а также внешние документы (договора водопользования, акты обследований, фотоматериалы, протоколы лабораторных анализов), доступные напрямую из ГИС-интерфейса. Все данные имеют строгую геопривязку, что обеспечивает наглядную визуализацию и совместный геопространственный анализ разнородной информации.

Список литературы

1. Борисов В.И. Реки Кубани. – Краснодар: Кн. изд-во, 1978. – 79 с.

2. Суслов О.Н. Степные реки Краснодарского края: монография. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 256 с.

3. Схема комплексного использования и охраны водных объектов рек бассейна Азовского моря междуречья Кубани и Дона (утв. приказом Кубанского БВУ ФАВР от 17.10.2014 № 388). Книга 1. Общая характеристика речных бассейнов. – 104 с.

4. Схема комплексного использования и охраны водных объектов рек бассейна Азовского моря междуречья Кубани и Дона (утв. Приказом Кубанского БВУ ФАВР от 17.10.2014 № 388). Книга 2. Оценка экологического состояния и ключевые проблемы речных бассейнов. – 86 с.

5. Проект Стратегии восстановления и экологической реабилитации степных рек Краснодарского края. Материалы в 7 книгах. Исполнитель – АО «Кубаньводпроект». Краснодар, 2011.

6. Горюнова С.В. Закономерности процесса антропогенной деградации водных объектов: диссертация ... доктора биологических наук: 03.00.16, 05.26.02. – Москва, 2006. – 388 с.

7. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты : Гидролого-гидрохимические аспекты. – М.: ГЕОС, 2007. – 251 с.

8. ГИС Аксиома. Версия 6.2. Руководство пользователя. ООО «Эсти», 2025. – 371 с.

9. PostgreSQL 16.15 Documentation. Электронный ресурс: https://www.postgresql.org/docs/16/index.html (дата обращения 14.08.2026)

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ЭКОЛОГИЯ ТУРКМЕНИСТАНА

Кепбанов П.А.[1], *Овезбердыева А.*[2]
[1]Национальный институт пустынь, растительного и животного мира, г.Ашхабад
[2]Германское общество международного сотрудничества, г. Ашхабад
e-mail: pirlikep@yandex.ru

Аннотация: Вода является ключевым ресурсом для жизнедеятельности и развития Туркменистана, который располагаясь в аридном регионе, сталкивается с ограниченностью водных запасов и высокой уязвимостью из-за изменения климата. Учитывая зависимость на 90% от трансграничной реки Амударья, рациональное водопользование и долгосрочное планирование составляют основу государственной политики страны. Туркменистан активно продвигает водную дипломатию, выступая за решение трансграничных вопросов на основе международного права и под эгидой ООН.

Ключевые слова: водные ресурсы, ИУВР, устойчивое развитие, межгосударственное сотрудничество.

WATER RESOURCES AND ECOLOGY OF TURKMENISTAN

Kepbanov P.A.[1], *Ovezberdyeva A.*[2]
[1]National Institute of Deserts, Flora and Fauna, Ashgabat
[2]Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Ashgabat
e-mail: pirlikep@yandex.ru

Abstract: Water is a key resource for the livelihood and development of Turkmenistan, which, being located in a desert zone, faces limited water reserves and high vulnerability due to climate change. Given its 90% dependence on the transboundary Amu Darya River, rational water use and long-term planning form the core of the country's state policy. Turkmenistan actively promotes water diplomacy, advocating for the resolution of transboundary issues based on international law and under the auspices of the UN.

Keywords: water resources, IWRM (Integrated Water Resources Management), sustainable development, interstate cooperation

Вода относится к основным природным ресурсам необходимым не только для жизни человека, суверенитета и независимости экономического развития страны, но и поддержания жизнеспособности экологических комплексов, всего мира живой природы. Туркменистан ограничен водными ресурсами из-за своего расположения в пустынной зоне с резко континентальным климатом, и в большей части его территории нет проточных вод. В условиях резко континентального климата и ограниченных природных водных запасов рациональное использование водных ресурсов занимает центральное место в государственной политике Туркменистана. Современные климатические изменения усиливают уязвимость водного сектора. Повышение температуры воздуха, сокращение речного стока, деградация ледников и учащающиеся засушливые периоды оказывают серьёзное влияния на водоснабжение, что требует системных решений и долгосрочного планирования [1].

Водные ресурсы Туркменистана составляют около 25 млрд. км^3 и складываются из трансграничных рек Амударьи, Мургаба, Теджена, Атрека. При этом река Амударья

обеспечивает около 90% водоснабжения страны. В этот объём включены подземные и возвратные воды, преимущественно сельскохозяйственные, образующиеся как на территории самой страны, так и поступающие с территории Узбекистана по системам межгосударственных дренажных коллекторов [2].

Туркменистан активно продвигает водную и экологическую дипломатию. Страна выступает за решение трансграничных водных вопросов на основе международного права, с учётом интересов всех государств региона и при участии международных организаций (в том числе ООН). Туркменистан предлагал, например, разработать Водную Стратегию ООН [3], учредить Специальную Программу ООН для бассейна Аральского моря [4] или создать Региональный центр по технологиям, связанным с изменением климата в Центральной Азии [5].

Туркменистан также выступил с предложением создания Регионального совета по вопросам водопользования в странах Центральной Азии под эгидой ООН, который мог бы стать эффективной структурой, координирующей усилия в данной области, действенным механизмом водопользования из трансграничных рек региона.

Поскольку значительная часть водных ресурсов – трансграничные (Амударья), страна развивает диалог с соседями. Например, в мае 2021 года Туркменистан и Узбекистан подписали соглашение о создании совместной межправительственной комиссии по водохозяйственным вопросам – это помогает координировать управление общими ресурсами [6].

В стране работает Закон Туркменистана «О питьевой воде» (2010 г.) [7], Кодекс Туркменистана «О воде» (2016 г.) [8]. Закон направлен на создание государственных гарантий обеспечения населения питьевой водой; устанавливает экономические и организационные основы рационального использования и экологической защиты от загрязнения систем питьевого водоснабжения. Водный кодекс Туркменистана задаёт правовые рамки: он направлен на охрану водных объектов, предотвращение их истощения и загрязнения, а также на стимулирование рационального использования. В стране внедряют принципы Интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР), что предполагает координацию разных отраслей и учёт интересов всех водопользователей. Также совершенствуют механизмы: вводят платность специального водопользования, устанавливают ответственность за нарушения, создают стимулы для внедрения водосберегающих практик.

Аридность климата обуславливает возможность земледелия и жизнеобеспечения большей части растительного мира только при искусственном орошении. В сельском хозяйстве активно переходят с традиционного бороздового полива на капельное и

дождевальное орошение — это даёт экономию воды до 40–50%. Развивают технологии вторичного использования солёных и дренажных вод. Внедряют цифровые системы для полного учёта потребляемых ресурсов. Государство стимулирует внедрение водосберегающих технологий: предоставляет льготы юридическим и физическим лицам. Такой подход решает сразу несколько задач: обеспечивает стабильное снабжение населения питьевой водой, поддерживает развитие агропромышленного комплекса (что критично для страны с аридным климатом), способствует охране окружающей среды и улучшению экологического состояния территорий.

Величина стока, поступающая на территории Туркменистана, определяется не только природными факторами, но и в значительной степени хозяйственной деятельностью людей. Так, большая часть стока рек Теджен и Атрек, часть стока р. Мургаба и малых рек разбирается на различные нужды в сопредельных странах. Постепенное увеличение этой доли имеет устойчивую тенденцию. Следует ожидать последствий из-за роста водозабора с Афганистаном в будущем в равной степени для всех стран региона.

Вопросы регулирования стока трансграничных рек, строительства новых водозаборных сооружений, водопотребления, перераспределения лимитов водозабора внутри хозяйственного года должны решаться только на основе двухсторонних или многосторонних договоренностей с сопредельными государствами, на территории которых находятся бассейны этих рек. Их согласованные действия позволят снизить антропогенную нагрузку на окружающую природную среду и эффективнее использовать имеющиеся поверхностные водные ресурсы [2].

За последние десятилетия в стране создан мощный водохозяйственный комплекс, обеспечивающий все отрасли экономики и социальные нужды населения в пресной воде, в том числе для сельскохозяйственного производства. На государственном уровне проводится масштабная работа по рациональному водопользованию. Проводится модернизация водной инфраструктуры страны. Увеличивают ёмкость водохранилищ, повышают пропускную способность рек, оросительных и коллекторных сетей. Открытые каналы заменяют закрытыми трубопроводами — это снижает потери от испарения и фильтрации. Строят малые водохранилища и искусственные водоёмы в предгорных зонах, чтобы аккумулировать паводковые и селевые воды, использовать их для орошения и восполнения подземных запасов. В настоящее время протяженность оросительной сети составляет более 43 тыс. км, а дренажной сети около 38 тыс. км, имеется 15 водохранилищ с суммарной регулирующей ёмкостью около 4,0 млрд. $м^3$. Недавно в центральной части Копетдага, то есть на юге города Ашхабада, был введен в

эксплуатацию комплекс селе-отводных сооружений. Поскольку город расположен вдоль потоков селевых вод, этот объект имеет большое стратегическое значение для устранения вреда, наносимого населённым пунктам, и в то же время он позволяет использовать селевые воды в земледелии, что положительно скажется на рациональном использовании местных вод.

Для более экономного рационального водопользования, продумываются оптимизация агропроизводства, методов орошения, где развитие отрасли сопряжено с повышением эффективности использования, совершенствования управления водными ресурсами, методов возделывания культур, а также выведение умеренно потребляющих влагу скороспелых и терпимых к ксерофитности экообстановки новых сортов сельскохозяйственных культур. В стране несколько лет ведутся научные изыскания по выявлению полезных растений, которые можно возделывать на основе слабоминерализованных КВД кормовых и технических культур, для обводнения пастбищ.

В последнее время развитие водо-потребляющих производств, аграрного сектора, расширение площади орошения возможно только путём повышения эффективности использования, совершенствования управления водными ресурсами, возделывания умеренно потребляющих поливную влагу культур и вовлечения в использование альтернативных источников водоснабжения.

Ограниченность водных богатств страны и их состояние свидетельствует о том, что данные вопросы будут решаться только за счёт внедрения водо-сберегающих технологий, рационального и продуманного использования оросительных вод. С этой точки зрения в каждой отрасли экономики следует наладить экономное водопользование. Основные направления рационального использования водных ресурсов страны: широкое внедрение водо-сберегающих технологий, внедрение методов капельного и дождевого орошения с целью экономии воды в земледелии; вопросы снижения потерь воды в оросительных арыках, использование дренажно-коллекторных вод, вопросы улучшения мелиоративного состояния орошаемых земель; соблюдение агротехнических мероприятий при выращивании сельскохозяйственных культур.

Для урегулирования квот на забор вод на экономику и бытовые нужды в структуре региональной организации – Международного фонда спасения Арала действует Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия, которая в составе представителей водного сектора пяти стран собирается дважды в год и устанавливает объём воды, которое государства используют в течение важного

вегетационного периода с тем, чтобы остатки доходили до усыхающего Аральского моря, часть комплексов экосистем люди стараются сохранить.

Туркменистан на свои средства осуществляет многоэтапный гидрообъект – строительство сети коллекторов Туркменского озера «Алтын асыр», который посредством собирательных велаятских коллекторов «уводит» коллекторно-дренажные воды в глубь пустыни Каракумы, в водонакопитель, который является пробным «шагом» хранения вод в природной впадине Карашор [9]. Благодаря вводу в эксплуатацию в 2009 году первой очереди Озера, со стороны Туркменистана были прекращены сбросы коллекторно-дренажных и вод в бассейн Амударьи, что ранее приводили к ухудшению качества вод.

Проблема приобретает еще большую важность на фоне глобального изменения климата, который также существенно повлияет на объём водопотребления и на гидрологический режим Амударьи. Единство экологических проблем в бассейне этой реки, приоритетность экологически безопасного и устойчивого развития, обуславливает необходимость межгосударственного сотрудничества для разработки стратегии совместного использования водных ресурсов на основе имеющихся механизмов, в том числе структурных подразделений Международного фонда спасения Арала, а также структур ООН. Напомним, действует Резолюция о сотрудничестве между этой авторитетной организацией и Фондом.

Переходя от стратегического планирования к практическим результатам, важным шагом являются конкретные достижения Туркменистана, полученные в рамках совместных партнерских программ с GIZ. Эти результаты наглядно демонстрируют, как на практике реализуются современные принципы интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР).

Цифровая трансформация и укрепление мониторинга осуществляется в рамках Региональной Программы GIZ «Управление водными ресурсами с учетом изменения климата в Центральной Азии». В рамках модернизации водохозяйственного сектора Туркменистана осуществляется следующие меры в области цифровизации и институционального развития [10]:

- В настоящее время идет процесс разработки и внедрения цифрового водного кадастра и системы электронного документооборота для Государственного комитета водного хозяйства Туркменистана. Это позволяет переводить управление водными данными на качественно новый цифровой уровень.
- Ведется планомерное техническое укрепление лабораторий, осуществляющих мониторинг качества воды на стратегически важных водохранилищах реки Каракум. В то же время на практике разворачиваются пилотные работы по мониторингу подземных

вод, что критически важно для оценки общего водного баланса страны в условиях климатических изменений.

- На региональном и национальном уровнях активно выстраивается сетевое взаимодействие и академическое сотрудничество между профильными институтами Центральной Азии. Через серию регулярных тематических семинаров идет постоянный живой обмен опытом и передовыми научными подходами в области интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР).

Эта системная и непрерывная работа закладывает надежный цифровой и технологический фундамент для обеспечения долгосрочной водной и экологической безопасности Туркменистана.

Климатическая адаптация и Nexus-подход на местах внедряется в рамках Региональной Программы «Управление климатическими рисками в Центральной Азии». С точки зрения экосистемного подхода и обеспечения продовольственной безопасности, ключевые мероприятия были развернуты в бассейне реки Мургап [10]:

- На основе всеобъемлющей оценки климатических рисков были четко определены уязвимые сектора бассейна Мургап и разработаны адаптационные меры, учитывающие социальные и гендерные аспекты.
- Ярким примером адаптации на стыке "вода-энергия-продовольствие" (Nexus) стала установка солнечной водонасосной станции на участке животноводческого хозяйства в Марыйском велаяте. Это позволило обеспечить экологически чистым и бесперебойным водоснабжением отдаленные пустынные пастбища без нагрузки на энергосистему.
- На основе глубокого анализа подготовлены практические рекомендации по модернизации гидрологического мониторинга и созданию систем раннего оповещения о климатических угрозах в бассейне реки.

Все эти достижения доказывают, что Туркменистан успешно совмещает внедрение высоких технологий на государственном уровне с практическими экологическими решениями на местах, защищая хрупкие аридные экосистемы.

В целом, анализ показывает, что основными причинами экологических проблем, связанных с водными ресурсами, являются:

- деградация природных комплексов на водосборной площади Амударьи, вследствие чего нарушается его гидрологический и гидрохимический режим;
- низкий КПД оросительных систем, огромные потери речной воды, приводящие не только к бесполезным потерям воды, но и к деградации окружающей природной среды;

• небольшая эффективность использования оросительной воды, которая является основной причиной подтопления и вторичного засоления орошаемых почв и формирования больших объёмов, минерализованных КДВ;

• использование бассейна реки для сброса сточных вод промышленности, коммунально-бытового сектора, КДВ, особенно в зоне формирования стока;

• отсутствие действенного мониторинга качества вод;

• недостаточное использование принципов и подходов интегрированного управления водными ресурсами.

Единство экологических проблем в бассейне р. Амударьи, приоритетность экологически безопасного и устойчивого развития обуславливает необходимость усиление существующего межгосударственного сотрудничества для разработки стратегии совместного использования водных ресурсов на основе МФСА, а также авторитетных международных организаций, прежде всего, структур ООН. Конечно, многие задачи ещё предстоит решить, и прогресс требует времени и ресурсов. Но видно, что Туркменистан системно подходит к вопросу, сочетая технические, организационные и образовательные меры.

Список литературы

1. Третье национальное сообщение Туркменистана об изменении климата, Ашхабад, 2015.

2. «Вопросы трансграничных рек, водного баланса и развития гидроэнергетических проектов стран Центральной Азии. Эффективное управление и рациональное использование водными ресурсами региона, в том числе трансграничных рек». РЕФЕРАТ.НИР «Аналитический центр в области экономической политики», Республика Казахстан.2022.166 с.

3. https://herat.tmembassy.gov.tm/ru/news/112708

4. https://un.mission.gov.tm/uploads/zqGR54R0ob.pdf

5. https://turkmenistan.gov.tm/ru/post/102570/novye-strategii-adaptacii-k-menyayushchemusya-klimatu

6. Интернет-газета TURKMENISTAN.RU

7. Закон Туркменистана «О питьевой воде», 2010.

8. Кодекс Туркменистана «О воде», 2016.

9. Национальная стратегия Туркменистана об изменении климата. Ашхабад, 2019. 16 с.

10. GIZ in Turkmenistan. Making development effective. GIZ Country brochure. Ashgabat, 2026.

Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы секвестрационные технологии

ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ РОССИИ: ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

***Фролова Н.Л.*[1]**, *Гречушникова М.Г.*[1], *Репина И.А.*[2], *Степаненко В.М.*[3]
[1]Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
[2]Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН
[3]Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова
E-mail: frolova_nl@mail.ru

Аннотация: В статье представлены результаты трёхлетних полевых исследований и математического моделирования эмиссии метана (CH_4) на 9 крупнейших водохранилищах России. Показано, что средние национальные коэффициенты выбросов метана, полученные по данным натурных измерений, ниже рекомендованных значений Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Для ряда водоёмов бореальной и умеренной зон зафиксировано нетто-поглощение парниковых газов, что позволяет говорить о возможном отрицательном углеродном следе крупных ГЭС.
Ключевые слова: эмиссия метана, водохранилища России, парниковые газы.

METHANE EMISSION FROM RUSSIA'S WATER RESERVES: DATA FROM OBSERVATIONS AND MATEMATICAL MODELING

***Frolova N.L.*[1], *Grechushnikova M.G.*[2], *Repina I.A.*[3], *Stepanenko V.M.*[4]**
[1]Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University
[2]A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences (RAS)
[3]Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University
E-mail: frolova_nl@mail.ru

Abstract: The article presents the results of three-year field studies and mathematical modeling of methane (CH_4) emissions at nine largest reservoirs in Russia. It is shown that the average national methane emission factors derived from field measurement data are lower than the default values recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). For a number of water bodies in the boreal and temperate zones, net greenhouse gas uptake was recorded, suggesting a possible negative carbon footprint of large hydropower plants.
Key words: methane emission, reservoirs of Russia, greenhouse gases

Введение. Гидроэнергетика относится к возобновляемым источникам энергии, однако вклад крупных водохранилищ в глобальное изменение климата остаётся дискуссионным. Затопление территорий и изменение гидрологического режима рек приводят к усилению эмиссии метана – газа с парниковым потенциалом, в 25–29 раз превышающим углекислый газ [1]. Метан образуется при анаэробном разложении органического вещества как автохтонного, так и аллохтонного происхождения.

Глобальные оценки эмиссии метана с поверхности водохранилищ сильно варьируются – от 2 до 122 Тг/год, что обусловлено различиями в методах измерений, сезонной и межгодовой изменчивостью, а также отсутствием унифицированного подхода к учёту площади водоёмов. Наиболее авторитетная база данных [2] даёт оценку 17.7 Тг CH_4/год, но практически не включает водохранилища России. Цель настоящей

работы – восполнить этот пробел путём комплексных натурных измерений и математического моделирования баланса метана на крупнейших российских водохранилищах. Решение этой задачи имеет не только научное, но и практическое значение для определения углеродной нейтральности отечественных ГЭС.

Методология исследований. Исследования охватили 9 водохранилищ, расположенных в различных природно-климатических условиях: Колымское, Бурейское, Волгоградское, Богучанское, Зейское, Куйбышевское, Рыбинское, Чиркейское и Саяно-Шушенское [3, 4]. Полевые кампании проводились в течение 2021–2023 гг. по сезонам года (весна, лето, осень, зима), продолжительность каждой кампании составляла не менее 5 дней. Измерения удельных потоков метана выполнялись с плавсредств методом плавучих камер (без разделения на диффузионную и пузырьковую составляющие) в соответствии с рекомендациями Международной ассоциации гидроэнергетики и программы ЮНЕСКО.

Для учёта пространственной неоднородности водохранилищ станции отбора проб назначались с учётом морфологических участков, мелководий и заливов. Осреднение потоков проводилось с использованием цифровых моделей рельефа дна, разделяющих водоём на квазиоднородные районы. Помимо потоков метана, измерялись вертикальные профили температуры, электропроводности, концентраций растворённого кислорода и метана, а также метеорологические параметры. Дополнительно оценивались содержание общего органического углерода в воде (по ГОСТ) и органического вещества в донных отложениях (методом прокаливания). Для определения скорости седиментации органического углерода использовались седиментационные ловушки и литературные данные.

С учётом низкого временного разрешения данных измерений, для определения годового баланса парниковых газов из водохранилищ и их поглощающей способности использовалась математическая модель LAKE, разработанная для моделирования гидрологических, термодинамических и биохимических процессов в озерах и водохранилищах [5]. Код модели находится в открытом доступе (https://mathmod.org/lake/). Специально модифицированная для расчета баланса парниковых газов водохранилищ версия модели LAKE 3.0 была оптимизирована в части параметров уравнений по результатам многочисленных натурных измерений на каждом водохранилище, благодаря чему удалось детально реалистично воспроизвести температурный, кислородный режим водоемов, а также годовой ход удельного потока (УП) метана из водохранилищ и суммарную годовую эмиссию.

Калибровка модели выполнялась в три этапа: воспроизведение температурного режима, кислородного режима и, наконец, потоков метана на границе «вода–атмосфера». Входными данными служили метеорологические реанализы ERA5 (температура, давление, влажность, ветер, радиационный баланс, осадки). Сравнение расчётных и измеренных значений показало хорошее согласие (см. таблицу 1), что позволило использовать модель для восстановления годового хода эмиссии в межэкспедиционные периоды.

Таблица 1 - Средние значения УП метана по данным моделирования и полевых измерений

Водохранилище	Средний УП метана по данным наблюдений, мгCH_4 м$^{-2}$ сут$^{-1}$	Средний УП метана по результатам модели за периоды проведения полевых кампаний, мгCH_4 м$^{-2}$ сут$^{-1}$
Рыбинское	66.9	67.9
Куйбышевское	15.0	16.0
Волгоградское	8.56	7.06
Чиркейское	4.04	3.53
Богучанское	1.42	1.66
Зейское	4.91	5.15
Бурейское	4.82	4.99
Колымское	1.47	1.51
Саяно-Шушенское	3.67	3.84

Результаты и обсуждение. На основе данных наблюдений и моделирования рассчитаны национальные коэффициенты эмиссии метана в соответствии с трехуровневой методологией МГЭИК. Для водохранилищ старше 20 лет поток углекислого газа считается сбалансированным, поэтому в итоговых оценках учитывался только метан. Средние коэффициенты за безлёдный период составили: бореальная зона: 5.6 ± 4.3 кг CH_4/га/год (близко к значению МГЭИК 13.6 ± 6.3); прохладная умеренная влажная зона: 33.2 ± 16.8 кг CH_4/га/год, что в 1.6 раза ниже коэффициента по умолчанию МГЭИК (54.0 ± 5.5).

В целом национальные коэффициенты оказались в среднем на 62% ниже оценок, получаемых по стандартной методологии МГЭИК. Это расхождение объясняется учётом региональных особенностей: сезонного ледяного покрова (зимняя эмиссия равна нулю), морфометрии водоёмов, трофического статуса, скорости осаждения органического углерода и других факторов. Балансовая оценка (3-й уровень МГЭИК) показала, что для Рыбинского водохранилища антропогенная составляющая потока парниковых газов составляет –0.18 ± 0.28 кг CO_2-экв/м² за безлёдный сезон, что свидетельствует о нетто-поглощении. Аналогичные результаты получены и для других волжских водохранилищ.

Для более глубоких сибирских водохранилищ эмиссия метана значимо меньше, а поглощение углерода – выше.

Эти предварительные результаты позволяют предположить, что крупные ГЭС бореальной и умеренной зон России могут иметь отрицательный углеродный след. Однако авторы подчёркивают необходимость дальнейших исследований: накопления многолетних рядов данных (не менее 10 лет), уточнения скорости седиментации, содержания органического углерода в воде и потоках парниковых газов на всех этапах – до строительства плотины, в самом водохранилище и ниже по течению.

Выводы. Проведённые натурные измерения и численное моделирование на 9 водохранилищах России показали, что фактические эмиссии метана ниже рекомендованных МГЭИК, особенно для умеренной влажной зоны. Получены свидетельства возможного нетто-поглощения парниковых газов, что ставит под сомнение устоявшиеся представления о значительном климатическом вкладе гидроэнергетических объектов. Для окончательного подтверждения этих выводов требуется продолжение мониторинга и совершенствование моделей.

Список литературы

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Masson-Delmotte et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.doi:10.1017/9781009157896.

2. Deemer B. R., Harrison J. A., Li S., et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis // BioScience. – 2016. – V. 66 (11). Pp. 949–964.

3. Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л., Агафонова С.А., Ахмерова Н.Д., Василенко А.Н., Гречушникова М.Г., Фролова Н.Л., Казанцев В.С., Шестеркин В.П. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. – № 6. С. 713–718.

4. Гречушникова М.Г., Репина И.А., Фролова Н.Л. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87. – № 6. С. 899–913.

5. Степаненко В. М., Гречушникова М. Г., Репина И.А. Численное моделирование эмиссии метана из водохранилища // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2020. – Т. 2. С. 76–99.

РЕЗУЛЬТАТЫ СУТОЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА КОНЦЕНТРАЦИЕЙ МЕТАНА В ВОДЕ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

*Усова Е.В., **Дмитрик Л.Ю.**, Анпилова Е.Л., Верещагин М.А.*
Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону
e-mail: chimanalit@inbox.ru

Аннотация: В работе представлены результаты суточных наблюдений за концентрациями метана, кислорода, сине-зеленых водорослей, показателями окислительно-восстановительного потенциала, температуры воды и скорости ветра, проведенные в конце августа 2025 на карбоновом полигоне «Цимлянское водохранилище». Отмечена высокая степень воздействия ветровой активности на все исследуемые характеристики в различных стадиях: усиление ветровой активности после штиля и последствия продолжительного ветрового перемешивания водных масс.

Ключевые слова: Цимлянское водохранилище, карбоновый полигон, метан, ветровая активность.

RESULTS OF DAILY OBSERVATIONS OF METHANE CONCENTRATION IN THE WATER OF THE TSYMLYANSKY RESERVOIR

*Elena V. Usova, **Leonid Yu. Dmitrik**, Evgeniya L. Anpilova, Michael A. Vereshchagin*
Russian Scientific Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don
e-mail: chimanalit@inbox.ru

Abstract: The paper presents the results of daily observations of the concentrations of methane, oxygen, blue-green algae, indicators of redox potential, water temperature, and wind speed, conducted at the end of August 2025 at the carbon monitoring site “Tsimlyansk Reservoir”. A high degree of influence of wind activity on the other studied characteristics at various stages was noted: an increase in wind activity after a calm period, and the consequences of prolonged wind-driven mixing of water masses.

Keywords: Tsimlyansk Reservoir, carbon test site, methane, wind activity.

Введение. Искусственные водоемы, такие как Цимлянское водохранилище, это важнейшие хозяйственные объекты, используемые энергетической, транспортной, сельскохозяйственной, коммунальной и другими отраслями промышленности, при этом, они остаются примером трансформации природной среды человеком, что позволяет контролировать некоторые процессы в таких водных объектах. В настоящее время, в условиях изменения климата, многие отечественные исследователи обратили внимание на искусственные водоемы, не только как на источники антропогенной эмиссии парниковых газов [1 – 5], но и с целью оценки секвестрационной и депонирущей способности водохранилищ [6,7]. Карбоновый полигон «Цимлянское водохранилище» создавался, в том числе, и для этих задач, важным шагом, на пути к их решению стало накопление информации о гидрологических и гидрохимических особенностях исследуемого водоема. Для чего было решено провести суточные наблюдения за рядом показателей воды и факторами на них влияющими.

Исследования проводились в период с 27 по 29 августа 2025 года на станции 4, которая располагалась в нижней части Цимлянского водохранилища, ее глубина составила 13 метров, и станции 11 с глубиной 9 м, расположенной выше по течению в

центральной части водоема недалеко от выхода эстуария р. Аксай Курмоярский (рис. 1). В ходе суточных наблюдений замеры и отбор проб проводились каждые 3 часа. Беспроводной метеостанцией DAVIS Instruments Vantage Pro2 6152EU измеряли среднюю скорость ветра и температуру воздуха, с помощью мульти-параметрического зонда Aquaprobe® AP-7000 определяли температуру, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП, Eh), концентрации растворенного кислорода и сине-зеленых водорослей в поверхностной и придонной воде, батометром Молчанова, согласно ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб», отбирали пробы воды для определения концентрации метана газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара на хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2», оснащенным дозатором равновесного пара и пламенно-ионизационным детектором, в соответствии с аттестованной методикой [8].



Рис. 1 – Карта-схема станций мониторинга в Цимлянском водохранилище в 2025 гг.

27 августа с 14 часов 40 минут начинались наблюдения на станции 4 (рис. 2а). Эти сутки по средней скорости ветра можно условно разделить на 2 этапа - умеренный с 14:40 до 20:45, когда этот показатель изменялся в интервале 0,4-1,8 м/с, и активный, который длился до конца наблюдений - 11:40 28 августа 2025 г., средняя скорость ветра в этот период варьировала от 2,7 до 5,8 м/с. При этом, во время умеренного этапа концентрации метана в придонном слое воды изменялись в узком диапазоне 4,77-5,66 мкл/л, а в поверхностной воде данный показатель колебался незначительно в пределах 2,04-2,34 мкл/л. С возрастанием ветровой активности в 23:45 содержание метана у дна достигло максимума - 6,23 мкл/л, к 2:50 наблюдалось его снижение в обоих слоях до минимальных значений - 1,76 и 3,9 мкл/л в поверхностной и придонной воде, соответственно. После

чего, в обоих горизонтах происходило повышение концентрации CH_4, которая к 11:40 28.08.2025 г. составила в придонной воде 6,07 мкл/л, а в поверхностной достигла суточного максимума в 4,66 мкл/л.

На станции 11 наблюдения были начаты 28 августа в 17:20, закончены ровно через 24 часа (рис 2б). Здесь ветровая активность на протяжении всего эксперимента была выше, чем на 4 станции, показатель средней скорости ветра изменялся от 2,7 до 5,8 м/с. С начала наблюдений и до 2:55 концентрации метана в обоих горизонтах воды изменялись незначительно, в поверхностном слое они варьировали в интервале 1,36-1,89 мкл/л, в придонном – 1,88-3,14 мкл/л. В 5:55 фиксировалось резкое увеличение содержания метана до максимальных значений как в поверхностной (до 4,39 мкл/л), так и в придонной (до 6,74 мкл/л) воде. После чего, до конца наблюдений концентрации CH_4 в поверхностном слое плавно снижались до значения 2,51 мкл/л, в придонной воде снижение остановилось в 14:45 на уровне 3,38 мкл/л, при последнем замере этот показатель оказался несколько выше и равнялся 4,31 мкл/л.

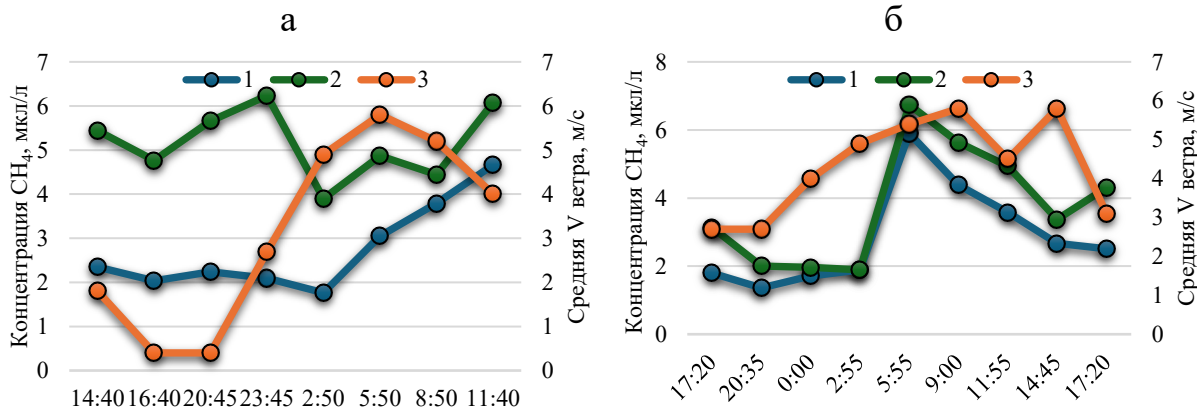


Рис. 2 – Суточная динамика концентраций метана в поверхностном (1) и придонном (2) слоях воды и средней скорости ветра (3) на станциях наблюдений 4 (а) и 11 (б)

Динамика окислительно-восстановительных условий (рис. 3) и кислородного режима (рис. 4) на исследуемых станциях в поверхностной воде за время наблюдений была невысокой, ОВП варьировал в пределах от 145,7 до 226,9 мВ на станции 4, и 140,3-219 мВ на станции 11, а кислород - в интервалах 8,12-10,63 мг/л и 8,25-9,74 мг/л, соответственно. В придонном слое воды 11 станции показатели редокс-потенциала и растворенного кислорода были немного ниже, чем в поверхностной, но кардинальных изменений не демонстрировали, Eh здесь колебался в пределах 63,7-185,1 мВ, кислород – 7,52-8,51 мг/л. На 4 станции изменение обоих показателей в гиполимнионе происходило в более широких диапазонах, ОВП – от -238,1 до 141,2 мВ, O_2 – от 0,48 до 8,37 мг/л. На графиках 2а и 3а заметно как с увеличением ветровой активности в 23:45 резко изменялся и редокс-потенциал, указывая на преобладание восстановительных

процессов, но при этом анаэробных условий не наблюдалось, кислород опускался до околонулевых значений на короткое время только спустя 6 часов, а восстановительные условия сохранялись до конца эксперимента.

Причиной резкого изменения ОВП, скорее всего, послужило ресуспендирование донных отложений в придонную воду станции 4, вызванное усилением ветровой активности, вследствие чего восстановительные процессы здесь преобладали над окислительными, при этом перемешивание водных масс препятствовало полному расходованию кислорода. Также эти предположения косвенно подтверждались данными о динамике температуры воды и концентрации сине-зеленых водорослей (рис. 5, 6).

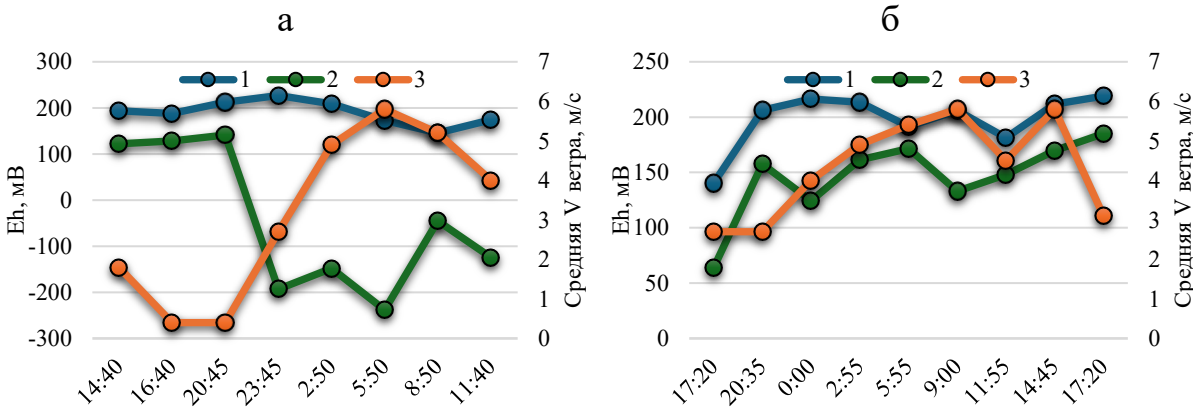


Рис. 3 – Суточная динамика окислительно-восстановительного потенциала в поверхностном (1) и придонном (2) слоях воды и средней скорости ветра (3) на станциях наблюдений 4 (а) и 11 (б)

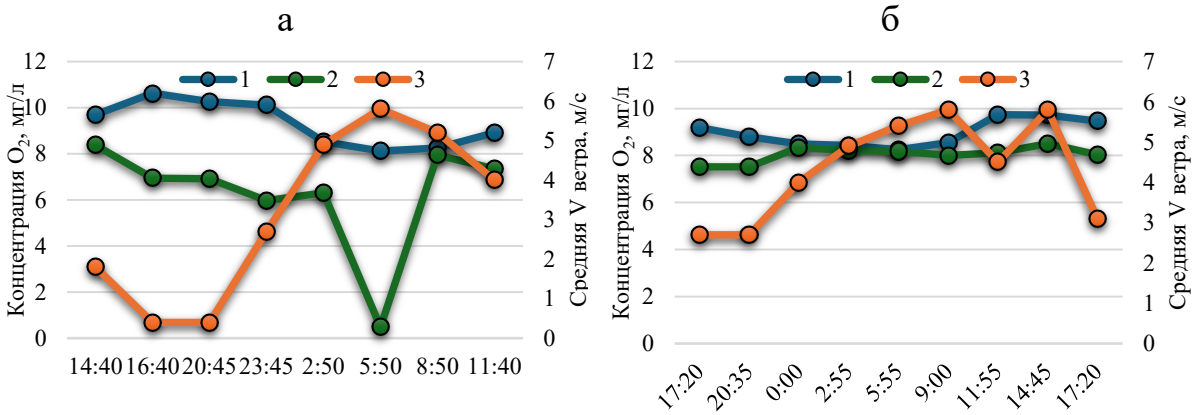


Рис. 4 – Суточная динамика концентрации кислорода в поверхностном (1) и придонном (2) слоях воды и средней скорости ветра (3) на станциях наблюдений 4 (а) и 11 (б)

Наблюдения за изменением температуры поверхностной и придонной воды показали отсутствие устойчивой стратификации водоема на обеих станциях. Максимальная разница в температуре слоев воды на станции 4 (глубина 13м) составила 2,3°С, а на 11 (глубина 9м) - всего 1,5°С. Такие небольшие перепады температуры поверхностной и придонной воды, нивелирующие суточные максимумы t воздуха, указывают на активное перемешивание водных масс, вызванное ветровой активностью.

Концентрация цианобактерий в поверхностной воде на станции 4 изменялась в интервале 32,9-80,8 тыс. клеток/мл, в течении всего эксперимента здесь наблюдалось возрастание данного показателя. Если в начале наблюдений рост числа сине-зеленых водорослей при низкой скорости ветра был обусловлен комфортной температурой и освещенностью, то в темное врем суток с увеличением ветровой активности происходило поднятие клеток, уже опустившихся в донные отложения. На это указывало резкое увеличение количества цианобактерий до максимального уровня в придонной воде, совпавшее с усилением ветра. Для придонного слоя воды 4 станции был зафиксирован диапазон значений концентрации сине-зеленых водорослей от 29,5 до 118,4 тыс. клеток/мл, при этом их количество до появления волновых явлений на водохранилище постепенно уменьшалось, а с повышением средней скорости ветра в 23:45 значительно возрастало, и продолжало скачкообразно меняться с 2:50 до 8:50, что могло быть следствием турбулентного перемешивания воды переносящего скопления цианобактерий.

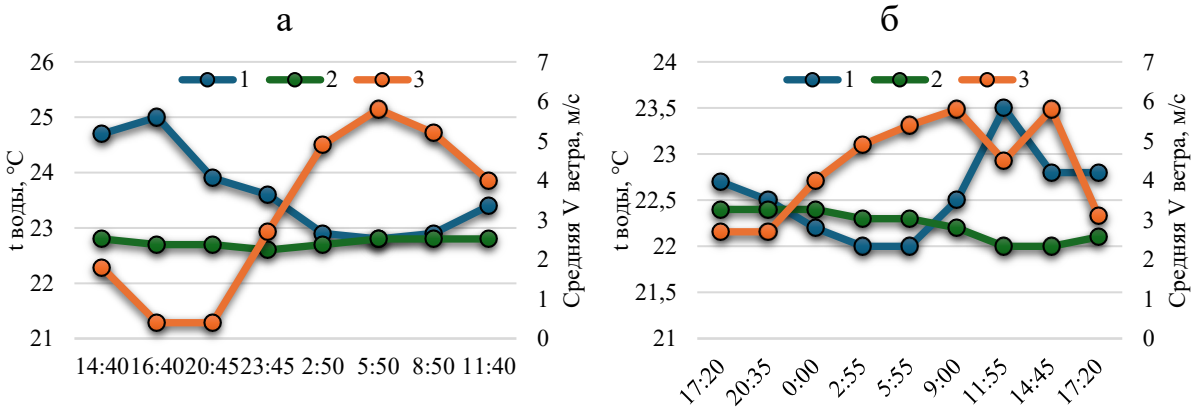


Рис. 5 – Суточная динамика температуры поверхностного (1) и придонного (2) слоев воды и средней скорости ветра (3) на станциях наблюдений 4 (а) и 11 (б)

На станции 11 концентрация сине-зеленых водорослей в поверхностной воде колебалась в пределах от 61,1 до 99,8 тыс. клеток/мл, в придонной – от 5,6 до 130,2 тыс. клеток/мл, в среднем этот показатель был выше, чем на 4 станции, для поверхностного слоя на 45%, для придонного на 26%. Большее количество цианобактерий и неоднородность распределения их концентрации в воде 11 станции можно объяснить ее нахождением на выходе эстуария реки и высокой ветровой активностью, продолжающейся на момент начала эксперимента более 18 часов. Оба эти фактора приводили к постоянному перемешиванию воды в этом районе.

а б

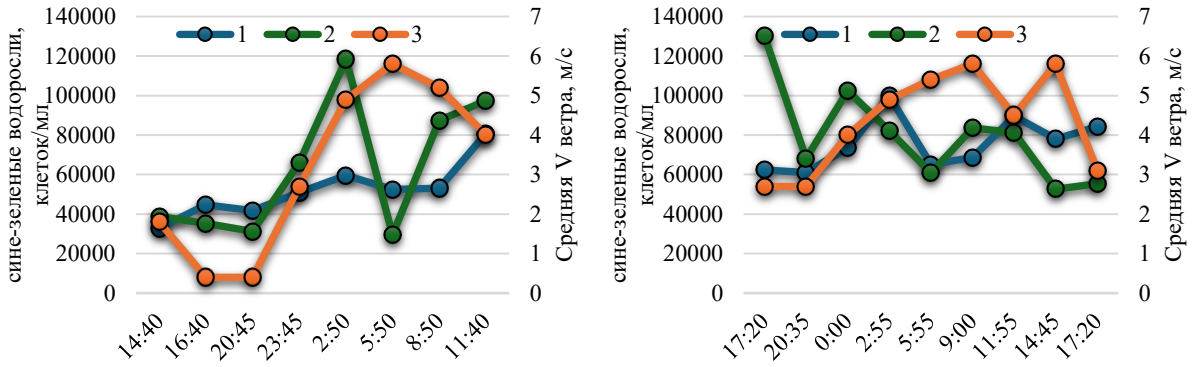


Рис. 6 – Суточная динамика концентрации сине-зеленых водорослей в поверхностном (1) и придонном (2) слоях воды и средней скорости ветра (3) на станциях наблюдений 4 (а) и 11 (б)

Суточные исследования, проведенные на станциях 4 и 11, показали, что скорость ветра является одним из ключевых параметров, определяющим гидрохимические условия Цимлянского водохранилища в период гомотермии. В частности, для станции 4 было показано как увеличение скорости ветра приводит к взмучиванию донных осадков, за которым следуют изменения окислительно-восстановительных условий, кислородного и температурного режимов водоема, а также росту концентрации метана в поверхностном слое воды, что влечет за собой и повышение эмиссии этого газа в атмосферу [9 – 11]. На станции 11 были зафиксированы последствия продолжительного ветрового перемешивания водных масс, выражающиеся в отсутствии каких-либо выраженных вертикальных градиентов для всех исследуемых показателей, в таких условиях быстрого турбулентного перемешивания возрастает и удельный поток метана.

Распределение биомассы сине-зелёных водорослей также напрямую было связано с турбулентностью: усиление ветра провоцировало подъём осевших клеток из придонного слоя и донных отложений в толщу воды. На станции 4 это проявлялось в синхронном с ростом ветровой нагрузки увеличении концентрации цианобактерий в придонной воде — до 118,4 тыс. клеток/мл, а на станции 11 средние концентрации оказались выше на 45 % в поверхностном и на 26 % в придонном слое по сравнению со станцией 4, что объясняется сочетанием эстуарного положения участка и продолжительного ветрового воздействия. При этом неоднородность распределения биомассы на станции 11 отражает постоянный характер турбулентного переноса.

Отсутствие устойчивой стратификации водной толщи на обеих станциях — о чём свидетельствовали незначительные перепады температур между слоями (не более 2,3 °C на станции 4 и 1,5 °C на станции 11) — подтверждали доминирующую роль ветрового перемешивания над термическими факторами в формировании гидрологического режима.

Таким образом, ветровая активность выступает главным фактором, определяющим суточную динамику гидрохимических и гидробиологических

показателей на исследуемых участках водохранилища. Локальные особенности (глубина, положение относительно устья реки) модулируют характер и интенсивность этих изменений, формируя разные типы отклика водной экосистемы на внешнее воздействие.

Список литературы

1. Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л., Агафонова С.А., Ахмерова Н.Д., Василенко А.Н., Гречушникова М.Г., Григорьев В.Ю., Казанцев В.С., Лисина А.А., Ломов В.А., Мишин Д.В., Сазонов А.А., Степаненко В.М., Соколов Д.И., Тимошенко А.А., Фролова Н.Л., Шестеркин В.П. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. начало масштабных исследований 2021 г. // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 713–718. https://doi.org/10.31857/S0321059622060141

2. Гречушникова М.Г., Мольков А.А., Ефимов В.А., Степаненко В.М., Соколов Д.И., Ломов В.А., Агафонова С.А., Фролова Н.Л., Репина И.А., Капустин И.А. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия Российской академии наук. Серия географическая. - 2023. - Т. 87. - №6. - С. 899-913. doi: 10.31857/S2587556623060080

3. Терский П.Н., Горин С.Л., Репина И.А., Агафонова С.А., Зимин М.В., Шестеркин В.П., Щекотихин Ф.А. Эмиссия метана и гидрологическая структура Зейского водохранилища в теплый период // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. - 2024. - Т. 60. - №4. - С. 516–532. doi: 10.31857/S0002351524040083

4. Ломов В. А., Гречушникова М. Г. Моделирование эмиссии метана из Цимлянского водохранилища с различным набором входных параметров // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 94–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-94-114; EDN: NZZNCT

5. Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Aukhadeev T.R., Latypova V.Z. Greenhouse gas fluxes (CH4, CO2) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 995-1012. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-995

6. 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

7. Romanovskaya, A.A., Polumieva, P.D., Repina, I.A, Trunov A. A., Stepanenko V. M., Lomov V. A. Large hydropower reservoirs in Russia can act as net anthropogenic sinks of carbon-based greenhouse gases. Carbon Balance Manage 21, 74 (2026). https://doi.org/10.1186/s13021-026-00429-1

8. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2012. 23 с.

9. Савенко В.С. Химия водного поверхностного микрослоя. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1990. 184 с.

10. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.Л. Анализ факторов формирования концентраций и эмиссионных потоков метана в водохранилищах // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 37-50. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50

11. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета. 2021. 366 с.

ВОДНОЕ ПАРТНЕРСТВО: ЭКОСИСТЕМНЫЙ ПОДХОД, ЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ОРИЕНТИРЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Сборник материалов Международной научно-практической конференции

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 24.09.2026 г.
Формат 60*84 1/8. Бумага офсетная.
Усл.печ.л. 41,38. Уч.-изд.л. 44,5.
Тираж 85 экз. Заказ № 47-371.

r ł ł qlsvqCt ţ .I .
346430, c. ţ ts⊃tsuj tc Cfffj , tjtc ł dCstsofj q2 , 82 ţ
ojdz: 8(8635)226-442, center-op@mail.ru

Издательство «Лик»
346430, г. Новочеркасск, пр. Платовский, 82 Е

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе «Колорит»
346430, г. Новочеркасск, пр. Платовский, 82 Е
Тел.: 8(8635)226-442, center-op@mail.ru