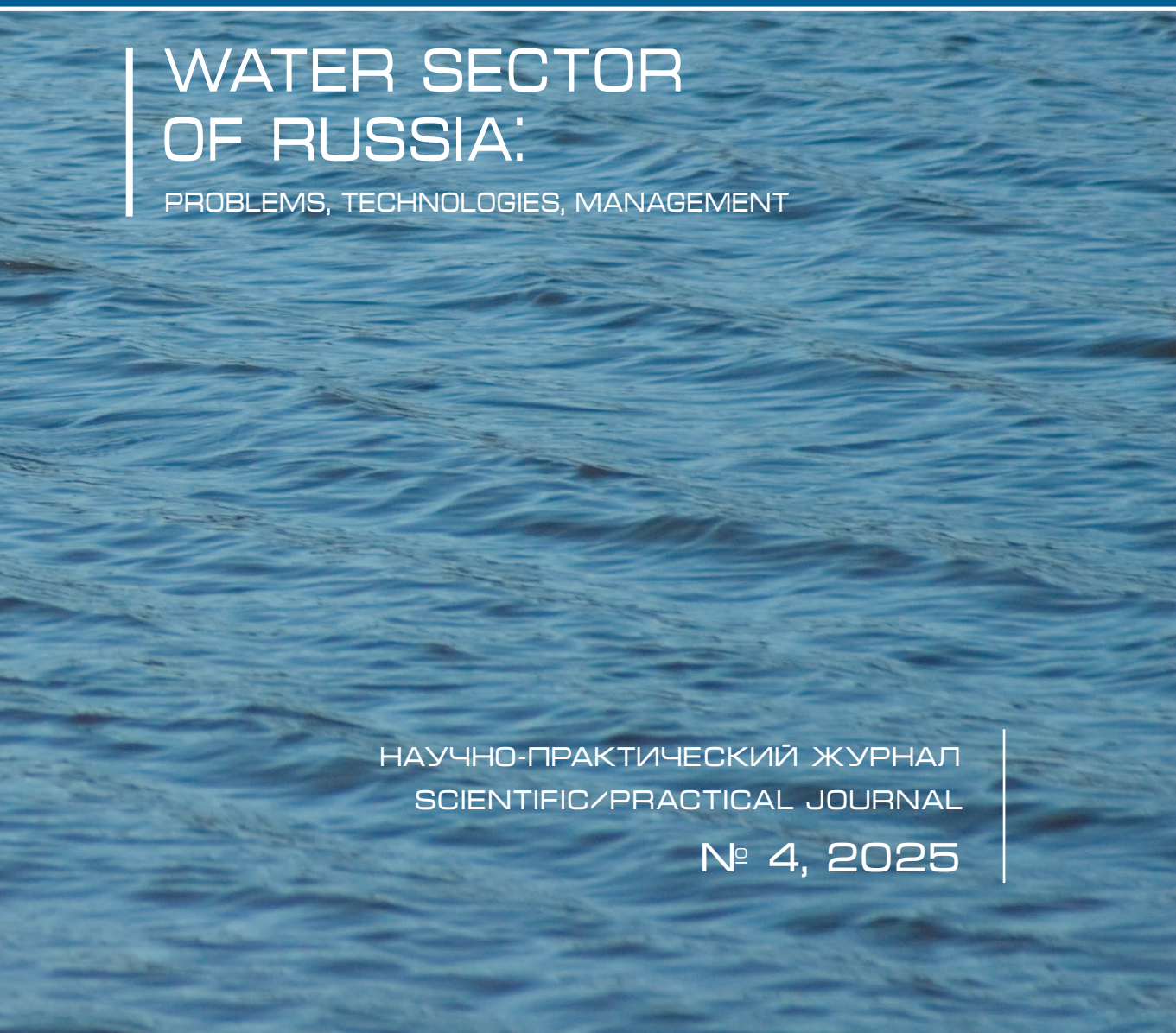
ISSN 1999-4508 (Print)
ISSN 2686-8253 (Online)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL
№ 4, 2025

РОСВОДРЕСУРСЫ
ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ В РАМКАХ МЕРОПРИЯТИЙ, ФИНАНСИРУЕМЫХ ЗА СЧЕТ СУБСИДИЙ НА ИНЫЕ ЦЕЛИ

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ»
РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ (ФГБУ РосНИИВХ)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Косолапов А.Е., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Лепихин А.П., д-р геогр. наук, профессор, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (Пермь, Россия)

РЕДКОЛЛЕГИЯ
Беляев С.Д., д-р геогр. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)
Болгов М.В., д-р техн. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)
Борисова Г.Г., д-р геогр. наук, профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
Веницианов Е.В., д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)
Гареев А.М., д-р геогр. наук, профессор, Башкирский государственный университет (Уфа, Россия)
Гармаев Е.Ж., д-р геогр. наук, академик РАН, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН (Улан-Удэ, Россия)
Зиновьев А.Т., д-р техн. наук, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН (Барнаул, Россия)
Козлов Д.В., д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва, Россия)
Никифоров А.Ф., д-р хим. наук, профессор, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
Румянцев В.А., д-р геогр. наук, академик РАН, профессор, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)
Селезнёв В.А., д-р техн. наук, профессор, Институт экологии Волжского бассейна РАН (Тольятти, Россия)
Федоров Ю.А., д-р геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)
Хафизов А.Р., профессор, Башкирский государственный аграрный университет (Уфа, Россия)
Чалов С.Р., д-р геогр. наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)
Шевчук А.В., д-р экон. наук, профессор, Совет по изучению производительных сил Всероссийской академии внешней торговли Минэкономразвития России (Москва, Россия)
Шмакова М.В., д-р геогр. наук, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)
Ясинский С.В., д-р геогр. наук, Институт географии РАН (Москва, Россия)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ
Габриелян Б.К., д-р биол. наук, профессор, Национальная академия наук Республики Армения (Ереван, Республика Армения)
Гюнтер Блешль, профессор, Институт гидротехники и управления водными ресурсами (Вена, Австрия)
Драган А. Савич, профессор, Центр водных систем Университета Эксетера (Эксетер, Великобритания)
Карло Гуальтери, профессор, Университет Неаполя им. Фридриха II (Неаполь, Италия)
Кью Джи Ванг, профессор, Университет Мельбурна (Мельбурн, Австралия)
Слободан П. Симонович, профессор, Университет Западного Онтарио (Онтарио, Канада)

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕДАКТОР
Валек Н.А., канд. филол. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 4, 2025

ЕКАТЕРИНБУРГ
YEKATERINBURG

Журнал входит в ядро РИНЦ и в список журналов RSCI
(Russian Science Citation Index)

РОСВОДРЕСУРСЫ
PUBLISHING OF THE JOURNAL IS EFFECTED WITHIN THE FRAMEWORK OF THE STATE ASSIGNMENT APPROVED BY FEDERAL AGENCY OF WATER RESOURCES

FOUNDER OF THE JOURNAL «WATER SECTOR OF RUSSIA: PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT»
RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE FOR INTEGRATED WATER MANAGEMENT AND PROTECTION (RosNIIVKh)

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR
Aleksey E. Kosolapov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)

DEPUTY CHIEF EDITOR
Anatoliy P. Lepikhin, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Institute of Mining of the Ural branch of Russian Academy of Sciences (Perm, Russia)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD
Sergey D. Belayev, Dr. Sc. (Geographical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)
Mikhail V. Bolgov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Water Problems Institute of Water Problems (Moscow, Russia)
Galina G. Borisova, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Evgeniy V. Venitsianov, Dr. Sc. (Physical/mathematical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems (Moscow, Russia)
Aufar M. Gareyev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Bashkir State University, Chair of Hydrology and Geo/ecology (Ufa, Russia)
Endon Z. Garmaev, Dr. Sc. (Geographical), Academician of RAS, Baykal Institute of Nature Management of the Siberian branch of Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia)
Aleksandr T. Zinovyev, Dr. Sc. (Technical), Russian Academy of Sciences Siberian Branch Institute of Water and Environmental Problems (Barnaul, Russia)
Dmitriy V. Kozlov, Dr. Sc. (Technical), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
Aleksandr F. Nikiforov, Dr. Sc. (Chemical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Vladislav A. Rumyantsev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Limnology, (St. Petersburg, Russia)
Vladimir A. Seleznyev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of the Volga Basin Ecology Laboratory for Water Bodies Monitoring (Togliatti, Russia)
Yuri A. Fedorov, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Southern Federal University (Rostov-na-Donu, Russia)
Airat R. Khafizov, Professor, Bashkir State Agrarian University (Ufa, Russia)
Sergey R. Chalov, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Anatoliy V. Shevchuk, Dr. Sc. (Economic), Professor, Ministry of Economic Development of the Russian Federation Russian Academy of External Trade Board for Studying Productive Forces (Moscow, Russia)
Marina V. Shmakova, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Limnology (St. Petersburg, Russia)
Sergey V. Yasinskiy, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Geography (Moscow, Russia)

INTERNATIONAL BOARD
Bardukh K. Gabrielyan, Dr. Sc. (Biological), Professor, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (Yerevan, Armenia)
Günter Blöschl, Professor, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management (Vienna, Austria)
Dragan A. Savić, Professor, Centre for Water Systems University of Exeter (Exeter, Great Britain)
Carlo Gualteri, Professor, Federico II University (Napoli, Italy)
QJ Wang, Professor, University of Melbourne (Melbourne, Australia)
Slobodan P. Simonovic, Ph.D, University of Western Ontario (Ontario, Canada)

EXECUTIVE EDITOR
Nataliya A. Valek, Cand. Sc. (Philological), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Вододеление в трансграничных бассейнах рек с учетом экологического стока (на примере бассейна реки Урал)
О.И. Никитина, А.Е. Косолапов.....5

Повышение уровня воды Куйбышевского водохранилища в условиях климатических изменений
А.В. Селезнева, В.А. Селезнев.....25

Изменение ресурсов речного стока под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов (на примере р. Чумыш)
Е.Ю. Седова, С.Ю. Самойлова.....44

Эколого-гидрогеохимическая оценка подземных вод разнотипных по антропогенной нагрузке сельских поселений Белгородской области
И.И. Косинова, Ф.Н. Лисецкий, В.А. Бударина.....61

Оценка влияния урбанизации водосбора на водный баланс и водообмен Суздальских озер Санкт-Петербурга
М.Л. Марков, Е.В. Гуревич, С.А. Иванова.....75

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Эколого-геохимическая оценка состояния реки Уруп в зоне действия Урупского ГОК
И.В. Бегдай, Е.Г. Мишвелов, К.В. Харин, К.Ю. Шкарет.....94

CONTENT

STUDIES OF WATER RESOURCES

Transboundary water allocation and environmental flows
(Ural River basin study case)
O.I. Nikitina, A.E. Kosolapov.....5

The Kuibyshev Reservoir water level increasing
in the context of the climate change
A.V. Selezneva, V.A. Seleznev.....25

Changes in river flow resources under the influence of natural,
climatic and anthropogenic factors (the Chumysh River as a study case
E.Y. Sedova, S.Y. Samoylova.....44

Ecological and hydrogeochemical assessment
of groundwater for rural settlements of the Belgorod region
with different types of anthropogenic load
I.I. Kosinova, F.N. Lisetskiy, V.A. Budarina.....61

Assessment of urbanization impact on water balance
and water exchange of Suzdal lakes in St. Petersburg
M.L. Markov, E.V. Gurevich, S.A. Ivanova.....75

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

Ecological and geochemical assessment of the state
of the Urup River in the area of the Urupsky Mining and Processing Plant
I.V. Begday, E.G. Mishvelov, K.V. Kharin, K.Yu. Shkarlet.....94

УДК: 556.18:504.06(282.247.322) *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-5-24*

Вододеление в трансграничных бассейнах рек с учетом экологического стока
(на примере бассейна реки Урал)

О.И. Никитина ✉, **А.Е. Косолапов**

✉ oxana.niki@yandex.ru

Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону – Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование посвящено разработке научно обоснованных подходов к трансграничному распределению стока в бассейне р. Урал с учетом экосистемных потребностей и международного опыта по сохранению водных экосистем. В условиях усиливающейся конкуренции за водные ресурсы и климатических изменений все более актуален переход от распределения фиксированных объемов воды к гибким и экосистемно ориентированным решениям. На основе анализа международной практики, положений действующего соглашения о совместном использовании и охране водных объектов в бассейне р. Урал и оценки состояния его водных экосистем показана необходимость пересмотра устоявшихся механизмов распределения водных ресурсов. **Методы.** Работа основана на анализе международной практики по распределению трансграничного стока, статистической обработке восстановленных рядов гидрологических наблюдений, комплексной оценке состояния водных экосистем с использованием абиотических и биотических индикаторов, а также применении методов критических гидрологических условий и эколого-гидрологического нормирования для расчета экологического стока. **Результаты.** Предложен подход к обоснованию экологического стока как ключевого элемента в системе распределения трансграничных водных ресурсов. На основе оценки состояния экосистем бассейна р. Урал сформулированы цели реализации экологического стока, включающие резервирование части стока для поддержания и восстановления экосистем, адаптацию к климатическим изменениям и сохранение биоразнообразия. Определены оценочные объемы экологического стока вблизи границы России и Казахстана, которые могут служить основой при планировании совместных решений по распределению водных ресурсов с учетом экосистемных потребностей. Результаты могут быть использованы в работе межправительственных комиссий и экспертных групп при уточнении механизмов трансграничного вододеления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трансграничное вододеление, бассейн р. Урал, экологический сток, экосистемные потребности, механизмы распределения стока.

Для цитирования: Никитина О.И., Косолапов А.Е. Вододеление в трансграничных бассейнах рек с учетом экологического стока (на примере бассейна реки Урал) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 5–24. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-5-24; EDN: XLKNIM

© Никитина О.И., Косолапов А.Е., 2025

Transboundary water allocation and environmental flows
(Ural River basin case study)

Oxana I. Nikitina ✉, **Aleksey E. Kosolapov**

✉ oxana.niki@yandex.ru

Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-on-Don – Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. This study focuses on developing scientifically grounded approaches to transboundary flow allocation in the Ural River Basin, considering ecosystem needs and international approaches to aquatic ecosystem conservation. Amid increasing competition for water resources and climate change, there is a growing necessity to shift from allocating fixed water volumes toward more flexible, ecosystem-oriented solutions. Based on an analysis of international practices, the provisions of the existing agreement on the joint use and protection of water bodies in the Ural River Basin, and an assessment of the current state of its aquatic ecosystems, the study highlights the need to revise established water allocation mechanisms. **Methods.** The research is based on analyzing international approaches to transboundary flow allocation, statistical processing of reconstructed hydrological observation series, and a comprehensive assessment of aquatic ecosystems using abiotic and biotic indicators. It also applies methods of critical hydrological conditions and ecohydrological normalization for calculating environmental flow. **Results.** The study proposes an approach to justify environmental flow as a key element in the system of transboundary water resource allocation. Based on an assessment of ecosystem conditions in the Ural River Basin, the objectives for implementing environmental flow have been formulated, including reserving a portion of the flow to maintain and restore ecosystems, adapt to climate change, and preserve biodiversity. Estimated environmental flow volumes near the Russia–Kazakhstan border have been identified, which may serve as a basis for planning joint decisions on water resource allocation that take ecosystem needs into account. The results can be applied by intergovernmental commissions and expert groups in refining transboundary water allocation mechanisms.

KEYWORDS: transboundary water sharing, the Ural River basin, environmental flow, ecosystem needs, flow allocation mechanisms.

For citation: Nikitina O.I., Kosolapov A.E. Transboundary water allocation and environmental flows (Ural River basin case study). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* No. 4. P. 5–24. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-5-24; EDN: XLKNIM

ВВЕДЕНИЕ

Происходящие во всем мире климатические изменения приводят к деградации водных экосистем и, как следствие, – к усилению конкуренции между странами-водопользователями. В этих условиях особую значимость приобретает международное сотрудничество в управлении трансграничными водными ресурсами. Эффективное управление ими стало одним из приоритетов глобального развития, что отражено в Цели устойчивого развития ООН № 6 «Чистая вода и санитария», а также в положениях ключевых международных документов: Конвенции по трансграничным водам (1992 г.) и Конвенции о праве несудоходных видов использования международных водотоков (1997 г.).

В мировой практике применяются различные механизмы распределения водных ресурсов, направленные на обеспечение как хозяйственных, так и экосистемных потребностей. Среди них выделяются два основных типа: фиксированные механизмы, основанные на согласованных объемах воды, и адаптивные, учитывающие изменения климата, водного режима и водопользования. В последние десятилетия наблюдается переход от фиксированных к адаптивным подходам[1], предусматривающим процентное распределение стока с пороговыми значениями и возможностью оперативной корректировки в зависимости от текущих условий.

Параллельно с этим существуют различные принципы распределения воды. К ним относятся: правовые принципы, основанные на историческом водопользовании (например, в Иране и Ираке); потребностные, учитывающие актуальные социально-экономические нужды (в Мозамбике, ЮАР, Свазиленде); иерархические, предполагающие распределение по приоритетам водопользования (в США, Великобритании); пропорциональные, основанные на делении воды по долям (в Сирии, Ливане); стратегические, ориентированные на долгосрочные выгоды (в Молдове, на Украине), и рыночные, использующие экономические стимулы (в Австралии).

Следует подчеркнуть, что распределению обычно подлежит не весь речной сток, а лишь его часть, с изначальным резервированием значительных объемов для обеспечения экосистемных потребностей, а также с учетом естественной гидрологической изменчивости, качества воды и технических ограничений[1].

Одним из ключевых элементов при распределении стока становится так называемый экологический сток. Согласно Брисбенской декларации (2007 г., обновлена в 2018 г.), он включает количественные, временные и качественные характеристики стока и уровней воды, необходимые для поддержания водных экосистем, которые, в свою очередь, обеспечивают социально-экономическое благополучие населения [1]. В связи с этим объемы экологического стока должны резервироваться в приоритетном порядке и не подлежат распределению между водопользователями, создавая тем самым базу для устойчивого функционирования экосистем.

Концепция экологического стока уже интегрирована в законодательство ряда стран (Китая, ЮАР, Мексики, США, Кении, Казахстана) и в международные соглашения, включая Соглашение России и Азербайджана по р. Самур (2010 г.) [2–4]. Так, новый Водный кодекс Республики Казахстан[2] (2025 г.) определяет экологический сток как обязательную долю стока, подлежащую сохранению в природе для поддержания водных экосистем, с учетом сезонности, межгодовой изменчивости и специфики конкретного бассейна.

В мировой практике уже существуют успешные примеры реализации экологического стока. Так, в Мексике к 2021 г. было создано 12 экологических водных резервов – объемов воды, не подлежащих хозяйственному использо-

[1] Руководство по распределению водных ресурсов в трансграничном контексте. ЕЭК ООН: Женева, 2022. 204 с.
[2] https://kodeksy-kz.com/ka/vodnyj_kodeks_rk/39.html.

ванию и предназначенных для поддержки водных экосистем, в т. ч. в трансграничном бассейне р. Усумасинта (Мексика – Гватемала) [3]. В трансграничных бассейнах реализация экологического стока требует согласованных действий, единых методик расчета и совместного мониторинга.

Одним из значимых трансграничных бассейнов Евразии является бассейн р. Урал (Жайык), расположенный на территории России и Казахстана. Длина реки составляет 2 428 км, площадь бассейна – 237 тыс. км^2. Основной сток формируется в верхнем и среднем течении р. Урал, включая его притоки: реки Сакмара, Илек и Орь[3]. Среднемноголетний годовой сток у границы России и Казахстана (в створе р. Илек) составляет 7,7 км^3 (по восстановленным данным за 1933–2022 гг.) [5]. Более 80 % стока приходится на весеннее половодье, что подчеркивает высокую сезонную изменчивость водного режима[3]. Характерной особенностью бассейна являются также значительные межгодовые колебания стока и существенные потери воды в нижнем течении, вызванные испарением и водозабором [6]. В бассейне расположено множество прудов и водохранилищ, крупнейшее из которых – Ириклинское. Годовой водозабор в российской части бассейна составляет около 1,6 км^3, из которых 0,31 км^3 приходится на безвозвратное потребление [5].

Бассейн р. Урал обладает высокой экологической значимостью. В нем располагаются нерестилища осетровых рыб [7–8], пойменные территории выполняют важные природоохранные функции [9], а дельта и прибрежные участки Каспия включены в Рамсарский список водно-болотных угодий международного значения (рис. 1).

Совместное управление водными ресурсами в бассейне Урала осуществляется в рамках Соглашения между Россией и Казахстаном о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов (1992 г., уточнено в 2010 г.) и Протокола по бассейну р. Урал (1996 г.), который устанавливает объемы передачи стока в зависимости от водности года. Однако фиксированные объемы распределения, заложенные в Протоколе 1996 г., оказываются недостаточно гибкими в условиях меняющегося климата и ухудшения состояния экосистем. В связи с этим возникает необходимость разработки научно обоснованного подхода к вододелению, который обеспечивал бы баланс между хозяйственным использованием и экосистемными потребностями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа основана на анализе материалов о международных подходах и механизмах распределения трансграничного стока, а также включала статистическую обработку многолетних рядов гидрологических наблюдений. Актуальное состояние экосистем оценивалось с использованием абиотических и биотических индикаторов. Расчет экологического стока выполнен с применением методов критических гидрологических условий и эколого-гидрологического нормирования.

[3] Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Урал (Российская часть). Т. 1–6. Екатеринбург: ФГУП РосНИИВХ, 2014.

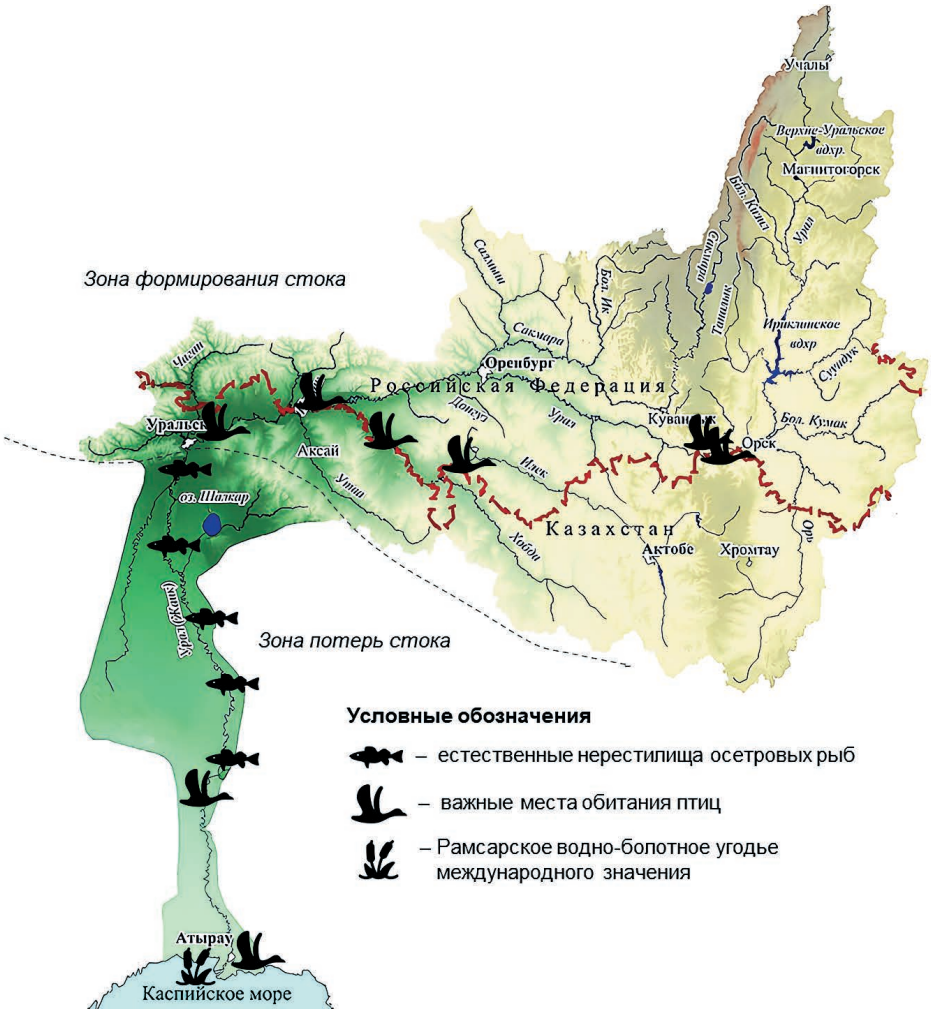


Рис. 1. Схема бассейна р. Урал и расположение особо ценных водных и пойменных экосистем.
Figure 1. Map of the Ural River basin and the distribution of ecologically valuable aquatic and floodplain ecosystems.

Перечисленные методы были использованы для решения трех основных задач: анализа изменений водного режима, оценки состояния водных экосистем и расчета экологического стока.

Анализ изменений водного режима базировался на восстановленном ряде стока за 1933–2022 гг. Учитывались как природные, так и антропогенные воздействия: климатические изменения, регулирование стока и его потери, водозабор. Учтены пространственные закономерности формирования и потерь стока.

Оценка состояния водных экосистем основана на обобщении материалов за последние 50 лет и результатах полевых работ: отбора проб поверхностных

вод, водной и прибрежной растительности, фитопланктона, зоопланктона, бентоса, личинок и молоди рыб [10].

Согласно международной классификации, включающей около 200 методов оценки экологического стока, все методы подразделяются на четыре основные группы: гидрологические, гидравлические, методы моделирования среды обитания и комплексные методы [11]. Для бассейна р. Урал были выбраны гидрологические методы – метод критических гидрологических условий и метод эколого-гидрологического нормирования, применяемые в условиях России и Казахстана [12–16]. Выбор этих методов обусловлен наличием длительных рядов гидрологических наблюдений и доступных биологических данных.

Метод критических гидрологических условий [12–13] базируется на определении минимально допустимых условий для воспроизводства водных организмов. В его основе лежит сопоставление гидрологических и биологических характеристик, прежде всего – состояния ихтиофауны как ключевого индикатора качества водных экосистем. При недостатке биологических данных используются косвенные признаки, такие как выход воды на пойму. На основе выявленных корреляций между гидрологическими характеристиками и биопродуктивностью определяются критические условия и соответствующий им объем стока (критический сток). Это позволяет определить экологически допустимое безвозвратное изъятие, рассчитываемое как разница между критическим стоком и историческим стоком 99%-ной обеспеченности, с учетом водности года, которая определяется как разность между полным объемом стока и объемом безвозвратного изъятия.

Метод эколого-гидрологического нормирования [14–15] направлен на сохранение водных экосистем в целом и основывается на предположении, что их наибольшую продуктивность обеспечивают условия средневодных лет. Метод использует исключительно гидрологические параметры, определяя диапазон экологического стока по значениям обеспеченности годового стока – от 99%-ной (лимитирующие условия) до 50%-ной (оптимальные условия). Промежуточные значения экологического стока определяются с использованием логнормальной кривой или региональных эмпирических зависимостей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка актуального состояния водных экосистем и цели экологического стока

Водный режим – ключевой абиотический индикатор, отражающий влияние антропогенных и климатических изменений и определяющий условия существования водных и прибрежных экосистем – от переноса стока воды и наносов до температуры и качества воды и состояния пойменной растительности.

Анализ интегральных кривых годового стока показывает, что на основном русле р. Урал многолетние фазы маловодья и многоводья выражены синхронно, с высокими коэффициентами корреляции (более 0,9) между гидрологическими постами (табл. 1). Левые притоки, особенно р. Орь и р. Илек, демон-

стрируют иную динамику стока и меньшую синхронность с основным руслом. В последние годы в бассейне р. Урал отмечается увеличение доли зимней межени (ноябрь – март) и снижение доли летне-осенней межени при незначительном сокращении стока половодья.

Многочисленные пруды и водохранилища в бассейне р. Урал влияют на гидрологический режим, вызывая ежегодные потери воды на испарение от 234 до 473 млн м³.

Биотические компоненты – важные индикаторы экосистемной устойчивости. Видовой состав ихтиофауны бассейна р. Урал увеличился с 58 до 64 видов, включая инвазивные [10, 17–18]. При этом за последние 30 лет сократилась численность массовых видов – сазана, леща, щуки, судака. Значение частиковых видов выросло, особенно в Ириклинском водохранилище, где сосредоточены основные промысловые участки [10]. Ранее бассейн отличался богатством осетровых, но их численность резко снизилась, а из 68 нерестилищ в нижнем течении Урала только шесть (11 %) сохраняют удовлетворительное состояние, остальные деградировали из-за заиления, зарастания и ухудшения субстрата [8].

Фитопланктон представлен преимущественно видами-индикаторами органического загрязнения (87,5 %), что свидетельствует о загрязнении водоемов органическими веществами; при этом значительная доля толерантных к загрязнению видов (27 %) указывает на высокий потенциал водных объектов к самоочищению. По данным современных исследований, в бассейне насчитывается 204 вида фитопланктона. За 30 лет видовое разнообразие фитопланктона в среднем течении р. Урал сократилось на 35 видов [10, 19]. Зоопланктон характеризуется низкой численностью и биомассой, что отражает малокормность реки. Зообентос включает 54 вида в русле и 21 в пойменных водоемах, при этом лишь пять видов обитают в обеих средах, что подчеркивает необходимость сохранения как русловых, так и пойменных местообитаний. Макрозообентос указывает на средний уровень кормовой продуктивности, а его низкое видовое разнообразие – на высокий уровень антропогенной нагрузки [10].

Сводные данные о современном состоянии водных экосистем бассейна р. Урал приведены в табл. 1.

Таким образом, на основе оценки абиотических и биотических показателей можно выделить основные направления, которым должны соответствовать цели реализации экологического стока для обеспечения экосистемных потребностей в бассейне р. Урал (рис. 2):

1. Резервирование стока для сохранения экосистем, т. е. обеспечение объема и режима стока, поддерживающих природные процессы в русловых и прибрежных экосистемах.

2. Повышение устойчивости к изменениям климата, т. е. адаптация водных экосистем к наводнениям и засухам для сохранения природных функций.

3. Поддержание биопродуктивности и биоразнообразия, т. е. обеспечение требуемого водного режима в приоритетных местообитаниях.

Таблица 1. Сводные сведения о факторах состояния водных экосистем в бассейне р. Урал
Table 1. Summary of factors influencing the condition of aquatic ecosystems in the Ural River basin

Показатель			Тренд / Статус	Комментарий
	Синхронность стока		!	Высокая синхронность на основном русле р. Урал: $r > 0{,}9$ между постами (Верхнеуральск – Магнитогорск – Ирикла). **Асинхронность многолетних фаз** водности характерна для левых притоков (Орь, Илек)
	Внутригодовая изменчивость стока		↓	Рост зимней межени, снижение летне-осенней межени, слабое уменьшение половодья
	Потери на испарение (водоемы)		!	Потери стока в российской части бассейна: 234–473 млн м^3 в год
Биотические	Ихтиофауна	Видовое разнообразие	↑	Рост с 58 до 64 видов, включая чужеродные виды
		Структура сообществ	↓	Снижение численности массовых видов – сазана, леща, щуки, судака
		Нерестилища осетровых	↓	Сохранились лишь 6 из 68 (11 %) в нижнем течении – деградация из-за заиления и зарастания
	Фитопланктон	Видовое разнообразие	↓	204 вида – общее видовое разнообразие – 35 видов / 30 лет – снижение разнообразия в среднем течении р. Урал
		Структура, индикаторы загрязнения	↓	87,5 % видов – свидетельствуют об органическом загрязнении 27 % видов – толерантны к загрязнению, указывают на потенциал к самоочищению
	Зоопланктон	Численность и биомасса	!	Низкая численность и биомасса; Урал – малокормный водный объект
	Зообентос	Структура сообществ	!	54 вида в русле, 21 в пойме; общих – 5. Необходима охрана обоих биотопов

Примечание: ↑ – наблюдаемое увеличение показателя, ↓ – наблюдаемое уменьшение показателя, — – отсутствие статистически значимых изменений, ! – ключевая характеристика без выраженного тренда изменения.
Symbols used: ↑ – observed increase in the indicator, ↓ – observed decrease in the indicator, — – no statistically significant change, ! – key characteristic without a clear trend.

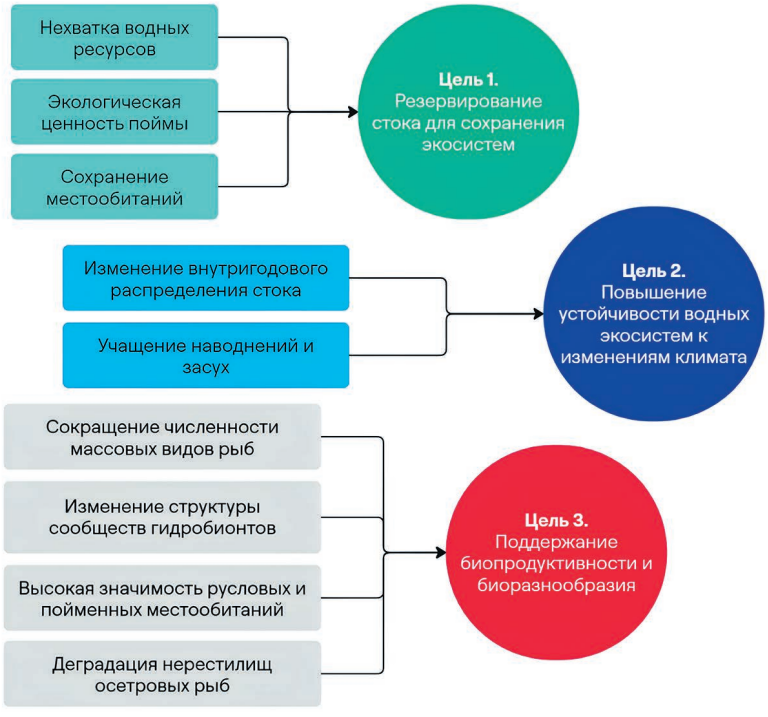


Рис. 2. Связь состояния водных экосистем с целями реализации экологического стока в бассейне Урала.
Figure 2. Relationship between the condition of aquatic ecosystems and the objectives for implementing environmental flow in the Ural River basin.

Предварительные оценки экологического стока в бассейне реки Урал

Метод критических гидрологических условий

Расчеты выполнены для створа р. Урал – с. Илек, расположенного вблизи границы России и Казахстана. Применяемый метод предполагает определение экологического стока в замыкающем створе всего бассейна, однако в данном случае расчеты основаны на доступных данных по российской части бассейна, а также учитывают природную специфику: выше рассматриваемого створа расположена зона формирования стока, ниже – преимущественно зона его потерь. Такой подход позволяет, с учетом пространственного распределения водного баланса, получить ориентировочную оценку экологического стока, подлежащего потенциальной передаче на территорию Казахстана.

Критический сток р. Урал ранее был определен В.Г. Дубининой [12] на основе зависимости между годовыми объемами стока и выживаемостью молоди осетровых и судака. По ее данным, критическое снижение численности молоди судака происходит при стоке 2–3 км^3. В других исследованиях минимальная эффективность воспроизводства осетровых зафиксирована при 3,5 км^3 [16, 20]. Учитывая приведенные пороговые значения, критический сток условно принят равным 3,0 км^3 как усредненное ориентировочное значение. Исторический сток, соответствующий стоку 99%-ной обеспеченности, состав-

ляет 1,7 км³. Соответственно, среднемноголетний объем допустимого безвозвратного изъятия, который определяется как разность между критическим и историческим стоком, равен 1,3 км³, или около 17 % от среднегодового стока (7,7 км³). Таким образом, экологический сток должен составлять не менее 83 % годового объема вне зависимости от водности года. С учетом потерь на испарение (473 млн м³ в год) доля воды, доступной для использования, дополнительно снижается: до 12 % – в многоводные годы и до нуля – в маловодные, когда весь сток требуется для поддержания экосистем (табл. 2).

Внутригодовое распределение рассчитано на основе восстановленных рядов естественного стока за 1933–2022 гг. для лет различной водности (табл. 3).

Таблица 2. Экологический сток и безвозвратное изъятие в бассейне р. Урал к створу с. Илек (Wср = 7,7 км³)
Table 2. Environmental flow and consumptive water use in the Ural River basin at Ilek (Wmean = 7.7 km³)

Обеспеченность года по стоку, Р %	Естественный сток, км³	Экологический сток		Общее безвозвратное изъятие		Безвозвратное изъятие с учетом потерь на испарение	
		Объем, км³	Доля от естественного стока, %	Объем, км³	Доля от естественного стока, %	Объем, км³	Доля от естественного стока, %
25	9,9	8,2	83	1,7	17	1,2	12
50	6,9	5,8	83	1,2	17	0,7	10
75	4,7	3,9	83	0,8	17	0,3	7
95	2,5	2,1	83	0,4	17	0	0

Метод эколого-гидрологического нормирования

Согласно положениям метода объем экологического стока в годы 25%-ной и 95%-ной обеспеченности равен объемам условно естественного (восстановленного) стока 50%-ной и 99%-ной обеспеченности соответственно. Для 50%-ной и 75%-ной обеспеченности применены региональные зависимости между годовым естественным и экологическим стоком [14, 15].

Согласно расчетам, объем экологического стока в створе р. Урал – с. Илек варьируется от 6,9 км³ и 4,1 км³ в многоводные годы до 3,2 км³ и 1,7 км³ в маловодные, что составляет от 59 % до 70 % от годового стока. После исключения потерь воды на испарение доля потенциально доступного стока составляет от 14 % (в засушливые годы) до 34 % (в годы средней водности) естественного стока (табл. 4).

Внутригодовое распределение экологического стока рассчитано по восстановленному ряду за 1933–2022 гг. на основе данных по фактически наблюдавшимся годам различной водности (табл. 5).

Таблица 3. Внутригодовое распределение экологического стока р. Урал – с. Илек по методу критических гидрологических условий
Table 3. Intra-annual distribution of environmental flow of the Ural River at Ilek based on the method of critical hydrological conditions

Обеспеченность стока / Календарный год	Сток	Месяц												Год
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
25 % / 1959–1960	Естественный – объем, млн м³	4 735	1 874	470	287	211	263	574	566	272	199	139	143	**9 732**
	Естественный – доля от годового стока, %	48,7	19,3	4,8	2,9	2,2	2,7	5,9	5,8	2,8	2,0	1,4	1,5	100
	Экологический – объем, млн м³	3 990	1 579	396	241	177	222	483	477	229	168	117	120	**8 200**
50 % / 1962–1963	Естественный – объем, млн м³	3 116	1 277	720	333	188	155	195	229	138	191	206	200	**6 949**
	Естественный – доля от годового стока, %	44,8	18,4	10,4	4,8	2,7	2,2	2,8	3,3	2,0	2,8	3,0	2,9	100
	Экологический – объем, млн м³	2 600	1 066	601	278	157	129	163	191	115	160	172	167	**5 800**
75 % / 1954–1955	Естественный – объем, млн м³	1 454	1 557	481	231	125	99	104	104	74	55	49	69	**4 400**
	Естественный – доля от годового стока, %	33,0	35,4	10,9	5,3	2,8	2,2	2,4	2,4	1,7	1,3	1,1	1,6	100
	Экологический – объем, млн м³	1 288	1 380	427	205	110	87	92	92	65	49	43	61	**3 900**
95 % / 1935–1936	Естественный – объем, млн м³	807	675	302	362	160	110	110	107	55	39	36	45	**2 807**
	Естественный – доля от годового стока, %	28,7	24,1	10,7	12,9	5,7	3,9	3,9	3,8	2,0	1,4	1,3	1,6	100
	Экологический – объем, млн м³	603	505	226	271	120	82	82	80	41	29	27	34	**2 100**

Таблица 4. Экологический и потенциально доступный сток р. Урал – с. Илек по методу эколого-гидрологического нормирования
Table 4. Environmental and potentially available flow of the Ural River at Ilek based on the ecohydrological normalization method

Обеспеченность года по стоку, P %	Естественный сток, км³	Экологический сток		Потенциально доступный сток		Доступный сток с учетом потерь на испарение	
		Объем, км³	Доля от естественного стока, %	Объем, км³	Доля от естественного стока, %	Объем, км³	Доля от естественного стока, %
25	9,9	6,9	70	3,0	30	2,5	26
50	6,9	4,1	59	2,8	41	2,4	34
75	4,7	3,2	68	1,5	32	1,0	22
95	2,5	1,7	67	0,8	33	0,3	14

ОБСУЖДЕНИЕ

В условиях изменений водного режима, климата и ухудшения состояния экосистем особенно актуальным становится переход к научно обоснованному распределению стока, при котором экосистемные потребности рассматриваются наравне с социально-экономическими интересами. Ключевым элементом такого подхода является выделение и сохранение экологического стока – объема воды, необходимого для поддержания водных и прибрежных экосистем, обеспечивающих экологическую устойчивость и социальное благополучие. В этой связи экологический сток должен сохраняться в водных объектах бассейна р. Урал и рассматриваться вне хозяйственного водопользования.

Предварительные оценки объемов экологического стока выполнены с применением двух гидрологических методов: критических гидрологических условий (по Дубининой) и метода эколого-гидрологического нормирования (по Фащевскому – Бурлибаеву). Оба подхода направлены на сохранение всего природного комплекса водных и прибрежных экосистем – русловых, пойменных и дельтовых. Метод Дубининой можно охарактеризовать как биолого-гидрологический, более чувствительный к качеству и полноте исходной информации. Метод Фащевского – Бурлибаева, напротив, более универсален, поскольку основан исключительно на гидрологических данных и удобен при оперативных крупномасштабных оценках. В связи с этим в данной работе метод эколого-гидрологического нормирования далее рассматривается в качестве базового.

Несмотря на различия в абсолютных значениях оценок годового экологического стока по двум методам (от 2,1 км³ до 8,2 км³ по методу критических гидрологических условий и от 1,7 км³ до 6,9 км³ по методу эколого-гидрологического нормирования в зависимости от водности лет), результаты сопоставимы по порядку величины и доле от общего годового стока. Так, согласно

Таблица 5. Внутригодовое распределение экологического стока р. Урал – с. Илек по методу эколого-гидрологического нормирования
Table 5. Intra-annual distribution of environmental flow of the Ural River at Ilek village based on the ecohydrological normalization method

Обеспеченность стока / Календарный год	Сток	Месяц												Год
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
25 % / 1959–1960	Естественный – объем, млн м³	4 735,1	1 873,9	469,9	286,6	210,6	263,0	573,7	566,4	271,7	199,5	139,1	143,0	**9 732**
	Естественный – доля от годового стока, %	48,7	19,3	4,8	2,9	2,2	2,7	5,9	5,8	2,8	2,0	1,4	1,5	100
	Экологический – объем, млн м³	3 381,4	1 338,2	335,6	204,6	150,4	187,8	409,7	404,4	194,1	142,4	99,4	102,1	**6 950**
50 % / 1962–1963	Естественный – объем, млн м³	3 115,7	1 277,2	720,4	333,4	187,9	154,6	194,8	229,4	138,4	191,4	205,8	200,4	**6 949**
	Естественный – доля от годового стока, %	44,8	18,4	10,4	4,8	2,7	2,2	2,8	3,3	2,0	2,8	3,0	2,9	100,0
	Экологический – объем, млн м³	1 838,2	753,5	425,0	196,7	110,8	91,2	115,0	135,3	81,6	112,9	121,4	118,2	**4 100**
75 % / 1954–1955	Естественный – объем, млн м³	1 453,6	1 557,2	481,3	231,2	124,6	98,7	103,5	103,5	73,9	55,4	48,7	68,6	**4 400**
	Естественный – доля от годового стока, %	33,0	35,4	10,9	5,3	2,8	2,2	2,4	2,4	1,7	1,3	1,1	1,6	100,0
	Экологический – объем, млн м³	1 057,1	1 132,4	350,0	168,1	90,6	71,8	75,3	75,3	53,7	40,3	35,4	49,9	**3 200**
95 % / 1935–1936	Естественный – объем, млн м³	806,7	675,2	301,6	362,0	160,1	109,7	110,0	107,4	55,1	38,7	36,0	45,0	**2 807**
	Естественный – доля от годового стока, %	28,7	24,1	10,7	12,9	5,7	3,9	3,9	3,8	2,0	1,4	1,3	1,6	100,0
	Экологический – объем, млн м³	479,9	401,7	179,4	215,3	95,2	65,2	65,4	63,9	32,8	23,0	21,4	26,8	**1 670**

первому методу, экологический сток должен составлять 83 % годового объема, а по второму – от 59 % до 70 %. Это подтверждает согласованность подходов в рамках исходных допущений и данных и свидетельствует о корректности предварительной оценки экологического стока.

Таким образом, определены ориентировочные объемы стока в створе с. Илек у границы России и Казахстана, необходимые для поддержания функционирования водных экосистем. Экологический сток (либо его часть) подлежит сохранению в реке, должен передаваться из России в Казахстан и далее в Каспийское море. Такой подход предполагает, что соответствующий объем стока не включается в распределение между хозяйственными водопользователями. Он соответствует положениям нового Водного кодекса Республики Казахстан, где экологический сток трактуется как обязательная часть годового стока, сохраняемая в природе. Он также согласуется с передовой международной практикой, в частности – с подходом Мексики к резервированию обязательной доли стока для экосистем [3].

В целях устойчивого распределения стока в условиях нарастающей гидрологической и климатической изменчивости предлагается иерархический подход:

– в первую очередь – обеспечение потребностей водных и прибрежных экосистем как основы для поддержания их устойчивости и природных функций;

– во вторую – удовлетворение социально-экономических нужд (питьевое, коммунальное, промышленное и сельскохозяйственное водоснабжение).

При таком подходе после установления примерных объемов экологического стока может быть определен тот водный ресурс, который подлежит использованию – это разница («дельта») между общим стоком и экологическим стоком. По результатам расчетов методом эколого-гидрологического нормирования экологически допустимый объем безвозвратного водоизъятия составляет до 0,8 км^3 в год при обеспеченности 95 % и до 1,5 км^3 в год 75%-ной обеспеченности. Метод критических гидрологических условий предполагает более жесткие ориентиры – до 0,4 км^3 и 0,8 км^3 соответственно (без учета потерь на испарение).

Сравнение предварительных объемов экологического стока с объемами, установленными в Протоколе 1996 г., показало, что в отдельные периоды – в частности, в зимние месяцы средневодных лет и в июле – августе маловодных лет – объемы передаваемого стока оказываются меньше предполагаемых экологических ориентиров (рис. 3 и табл. 6). Это может быть связано с изменениями водного режима, включая внутригодовое перераспределение стока, и свидетельствует о необходимости пересмотра требований к объемам передаваемого стока с учетом изменившихся условий.

Анализ фактических объемов водозабора в российской части бассейна р. Урал за 2020–2022 гг. (в диапазоне 0,53–0,77 км^3/год) показывает заметное снижение безвозвратного изъятия по сравнению с уровнем 1990–2010 гг. Эти значения в среднем соответствуют экологически допустимым объемам, рассчитанным по методу эколого-гидрологического нормирования. С учетом потерь

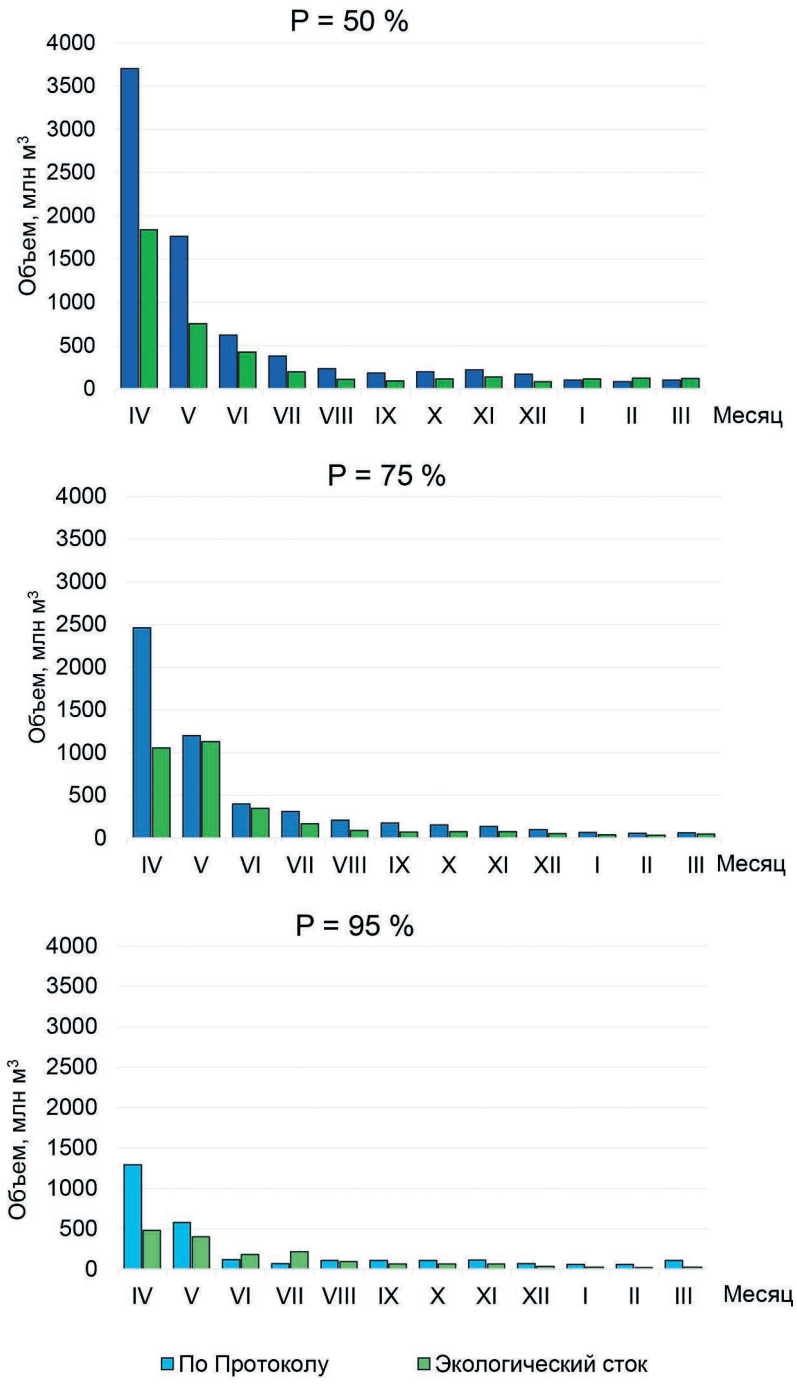


Рис. 3. Сравнение объемов стока р. Урал на границе России и Казахстана: сток по Протоколу 1996 г. и экологический сток в годы с разной обеспеченностью.
Figure 3. Comparison of the Ural River flow volumes at the Russia-Kazakhstan border: flow under the 1996 Protocol and environmental flow in years with different water availability.

Таблица 6. Объемы стока по р. Урал из России в Казахстан: по Протоколу 1996 г., экологический сток и доступный для использования сток
Table 6. Ural River flow volumes from Russia to Kazakhstan: according to the 1996 Protocol, environmental flow, and water available for use

Обеспеченность, %	Сток	За год	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
50	Согласно Протоколу	**7 790**	3 700	1 760	622	378	233	183	197	218	168	103	83,7	102
	Экологический	**4 100**	1 838	754	425	197	111	91	115	135	82	113	121	118
	Доступный	**3 690**	1 862	1 006	197	181	122	92	82	83	86	-10	-38	-16
75	Согласно Протоколу	**5 360**	2 460	1 200	399	311	211	176	153	134	101	64,6	57,6	63,8
	Экологический	**3 200**	1 057	1 132	350	168	90,6	71,8	75,3	75,3	53,7	40,3	35,4	49,9
	Доступный	**2 160**	1 403	68	49	143	120	104	78	59	47	24	22	14
95	Согласно Протоколу	**2 970**	1 290	579	120	68,6	109	106	108	113	69,9	59,2	58,8	108
	Экологический	**1 670**	480	402	180	215	95,2	65,2	65,4	63,9	32,8	23,0	21,4	26,8
	Доступный	**1 300**	810	177	-59	-147	14	41	43	49	37	36	37	81

на испарение общее водопотребление остается в пределах допустимых ориентиров, составляющих до 0,3 км^3 при обеспеченности 95 % и до 1,0 км^3 при 75 %. Тем не менее в маловодные периоды потребление воды приближается к предельным значениям, что подчеркивает необходимость предварительной оценки экосистемных потребностей при планировании любых дополнительных изъятий.

Следует отметить, что экологический сток – не единственная, но фундаментально необходимая мера для восстановления и поддержания водных экосистем. Кроме того, также требуются мероприятия по улучшению качества воды [21], восстановлению ценных местообитаний, борьбе с браконьерством и сохранению популяций ценных видов, прежде всего осетровых. Их успешное воспроизводство зависит как от режима стока, так и от наличия природных нерестилищ.

Включение положения об экологическом стоке в трансграничное соглашение между Россией и Казахстаном может стать важным шагом к сбалансированному учету природоохранных и социально-экономических интересов в бассейне р. Урал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование позволило установить, что действующий порядок вододеления в бассейне р. Урал, основанный на фиксированных объемах стока, не отражает современных изменений водного режима и состояния экосистем. Это указывает на необходимость пересмотра подходов к распределению стока с учетом экосистемных потребностей.

Оценка актуального состояния экосистем показала, что в последние десятилетия в бассейне наблюдается внутригодовое перераспределение стока (увеличение зимнего и сокращение летне-осеннего стока), при этом потери воды на испарение могут достигать 473 млн м^3 в год. Биотические индикаторы указывают на ухудшение состояния экосистем, включая снижение видового разнообразия фитопланктона на 35 видов (до 204), сокращение численности основных видов рыб (сазана, леща, щуки и судака), потерю 90 % нерестилищ осетровых рыб в нижнем течении. В соответствии с этими результатами сформулированы три ключевые цели экологического стока: резервирование воды для сохранения экосистем, повышение их устойчивости к климатическим изменениям, поддержание биоразнообразия и биопродуктивности.

Предварительные расчеты экологического стока р. Урал вблизи границы России и Казахстана показали потребности экосистем в объеме 59–70 % годового стока по методу эколого-гидрологического нормирования и 83 % по методу критических гидрологических условий. Эти результаты сопоставимы по порядку величин и служат ориентиром для сохранения водных и прибрежных экосистем. Предлагается признать экологический сток (или его часть) недоступным для распределения между водопользователями.

Новизна подхода заключается в использовании длинного восстановленного гидрологического ряда (1933–2022 гг.), учете пространственной дифференциации условий формирования и потерь стока, а также формулировании целей экологического стока на основе анализа абиотических и биотических индикаторов состояния экосистем.

Практические предложения включают закрепление понятия экологического стока в межгосударственных документах, пересмотр Протокола 1996 г., а также развитие сотрудничества России и Казахстана по расчету и распределению экологического стока в замыкающем створе реки и по бассейну в целом.

Ограничениями оценки являются ее предварительный характер и использование данных, полученных в створе у с. Илек на основе российских источников. Для комплексной оценки необходимо установить экологический сток в замыкающем створе с учетом водохозяйственных балансов обеих стран.

Предложенный подход может быть применен в управлении водными ресурсами крупных бассейнов, при разработке трансграничных соглашений, а результаты могут быть использованы в работе межправительственных комиссий и экспертных групп при уточнении механизмов трансграничного вододеления.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045.

2. Chen J., Li Q. Assessment of eco-operation effect of Three Gorges Reservoir during trial run period // Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. 2015. V. 32 (4). P. 1–6.
3. Salinas-Rodríguez S.A., Barba-Macías E., Infante Mata D., Nava-López M.Z., Neri-Flores I., Domínguez Varela R., González Mora I.D. What Do Environmental Flows Mean for Long-Term Freshwater Ecosystems' Protection? Assessment of the Mexican Water Reserves for the Environment Program // Sustainability. 2021. No 13, 1240. https://doi.org/ 10.3390/su13031240.
4. Беляев С.Д., Беляева И.У., Мерзликина Ю.Б., Морозова Е.Е., Принцева Т.М., Щипачева Л.А. Рекомендации по совершенствованию механизмов взаимодействия Российской Федерации по рациональному использованию и охране трансграничных водных объектов на основе передового международного опыта. Отчет о выполнении НИР (промежуточный за 2018 г.). Екатеринбург: ФГУП РосНИИВХ, 2018. 166 с.
5. Косолапов А.Е. Отчет о выполнении мероприятий Единой дорожной карты активизации сотрудничества по проведению исследований в бассейнах крупных рек (Урал, Иртыш и другие). Ростов-на-Дону: РосНИИВХ, 2024. 197 с.
6. Магрицкий Д.В., Сивохип Ж.Т., Павлейчик В.М., Кисебаев Д.К. Научно-прикладное изучение стока рек в бассейне Урала в XX в. – начале XXI в. Часть 1. Сток и водный режим. Многолетние изменения // Вопросы степеведения, 2023. № 1. С. 25–44. https://doi.org/10.24412/2712-8628-2023-1-25-44.
7. Ахмеденов К.М., Чибилев А.А. Современные экологические проблемы восстановления и сохранения популяции осетровых рыб в бассейне реки Урал // Юг России: экология, развитие. 2023. Т. 18. № 1. С. 6–16. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-1-6-16.
8. Shalgimbaeva G.M., Mugue N.S., Isbekov K.B., Volkov A.A., Mikodina E.V. Ural (Zhayik) River Spawning Grounds of the Sturgeon (Acipenseridae) in the Republic of Kazakhstan: Modern Situation // Journal of Ichthyology. 2022. Vol. 62. No. 7. P. 1439–1453.
9. Барбазюк Е.В. Редкие птицы, характерные для трансграничной реки Урал: современное распространение, лимитирующие факторы и угрозы // Вопросы степеведения. 2022. № 3. С. 65–75. https://doi.org/10.24412/2712-8628-2022-3-65-75.
10. Яковлев С.В. Анализ и обобщение гидробиологических данных для исследования водных объектов в бассейне реки Урал в рамках выполнения мероприятия «Разработка научно обоснованных принципов и механизмов межгосударственного распределения стока трансграничных рек Урал, Иртыш, Большой и Малый Узени между Российской Федерацией и Республикой Казахстан». Отчет по договору № Д/02/23. Волгоград, 2023. 376 с.
11. Dyson M., Bergkamp G., Scanlon J. Flow: The Essentials of Environmental Flows. Gland, Switzerland: IUCN – The World Conservation Union, 2003. 118 p.
12. Дубинина В.Г. Методические основы экологического нормирования безвозвратного изъятия речного стока и установления экологического стока (попуска). М.: Экономика и информатика, 2001. 118 с.
13. 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. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2009-3-26-61.
14. Фащевский Б.В., Бурлибаев М.Ж., Опп К., Бурлибаева Д.М. О концепции научного обоснования методики нормирования экологического и потенциально-свободного стока рек Казахстана // Гидрометеорология и экология. 2012. № 4. С. 66–100.
15. Бурлибаев М.Ж., Бурлибаева Д.М. Концептуальные основы нормирования экологического и свободного стока рек Казахстана // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 5. С. 52–73. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-5-52-73.
16. Магрицкий Д.В. Новые результаты определения экологического стока Нижнего Урала. Степи Северной Евразии: материалы X международного симпозиума. 2024. № X [Электронный ресурс]. URL: https://orensteppe.org/content/novye-rezultaty-opredeleniya-ekologicheskogo-stoka-nizhnego-urala.
17. Корляков К.А. Ихтиофауна Челябинской области: ревизия 2008–2018 гг. // Экология, природопользование и ресурсы Урала. 2019. № 2 (2). С. 4–9.
18. Чибилев А.А., Дебело П.В. Рыбы Урало-Каспийского региона. Серия: Природное разнообразие Урало-Каспийского региона. Екатеринбург, 2009. Т. 2. 229 с.

19. Алехина Г.П., Верхошенцева Ю.П., Шамраев А.В., Хардикова С.В. Состав фитопланктона как показатель экологического состояния среднего течения реки Урал и ее притоков // АгроЭкоИнфо. 2021. № 6 (48).
20. ПК «Институт Казгипрводхоз». Схема комплексного использования и охраны водных ресурсов реки Урал (Жайык) с притоками / Л.А. Малый, Д.Г. Рымкулова, Г.А. Сафонов и др. Алматы, 2007. Отчет в 6 т. и 11 кн.
21. Козлова М.А., Сивохип Ж.Т. Оценка динамики качества воды трансграничного бассейна реки Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 107–119. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2022-6-107-119.

REFERENCES

1. Arthington A.H., Bhaduri A., Bunn S.E., Jackson S.E., Tharme R.E., Tickner D., Young B., Acreman M., Baker N., Capon S., Horne A.C., Kendy E., McClain M.E., Poff N.L.R., Richter B.D., Ward S. The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows. *Frontiers in Environmental Science.* 2018. Vol. 6. 15 p. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045.
2. Chen J., Li Q. Assessment of eco-operation effect of Three Gorges Reservoir during trial run period. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*. 2015. Vol. 32 (4). P. 1–6.
3. Salinas-Rodríguez S.A., Barba-Macías E., Infante Mata D., Nava-López M.Z., Neri-Flores I., Domínguez Varela R., González Mora I.D. What Do Environmental Flows Mean for Long-Term Freshwater Ecosystems' Protection? Assessment of the Mexican Water Reserves for the Environment Program. *Sustainability*. 2021. № 13, 1240. https://doi.org/10.3390/su13031240.
4. Belyaev S.D., Belyaeva I.U., Merzlikina Yu.B., Morozova E.E., Printseva T.M., Shchipacheva L.A. Recommendations for improving mechanisms of the Russian Federation's cooperation on the rational use and protection of transboundary water bodies based on international best practices. Interim Research Report, 2018. Yekaterinburg: RosNIIIVKh. 166 p. (In Russ.).
5. Kosolapov A.E. Report on the implementation of activities of the Unified Roadmap for promoting cooperation in conducting research in large river basins (Ural, Irtysh, and others). Rostov-on-Don: RosNIIVKh, 2024. 197 p. (In Russ.).
6. Magritsky D.V., Sivokhip Zh.T., Pavleichik V.M., Kisebaev D.K. Scientific and applied study of river flow in the Ural Basin in the 20th – early 21st centuries. Part 1. Runoff and water regime. Long-term changes. *Steppe Science Issues,* 2023. No. 1. P. 25–44. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2712-8628-2023-1-25-44.
7. Akhmedenov K.M., Chibilev A.A. Current environmental issues of restoration and conservation of sturgeon populations in the Ural River Basin. *South of Russia: Ecology, Development.* 2023. Vol. 18. No. 1. P. 6–16. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-1-6-16 (In Russ.).
8. Shalgimbaeva G.M., Mugue N.S., Isbekov K.B., Volkov A.A., Mikodina E.V. Ural (Zhayik) River Spawning Grounds of the Sturgeon (Acipenseridae) in the Republic of Kazakhstan: Modern Situation. *Journal of Ichthyology*. 2022. Vol. 62. No. 7. P. 1439–1453. (In Russ.).
9. Barbazyuk E.V. Rare birds typical of the transboundary Ural River: current distribution, limiting factors, and threats. *Steppe Science Issues*. 2022. No. 3. P. 65–75. DOI: 10.24412/2712-8628-2022-3-65-75 (In Russ.).
10. Yakovlev S.V. Analysis and synthesis of hydrobiological data for the study of water bodies in the Ural River Basin as part of the activity "Development of scientifically-based principles and mechanisms of interstate flow distribution of transboundary rivers Ural, Irtysh, Bolshoy and Maly Uzen between the Russian Federation and the Republic of Kazakhstan". Contract report No. D/02/23. Volgograd, 2023. 376 p. (In Russ.).
11. Dyson M., Bergkamp G., Scanlon J. Flow: The Essentials of Environmental Flows. Gland, Switzerland: IUCN – The World Conservation Union, 2003. 118 p.
12. Dubinina V.G. Methodological foundations for environmental regulation of irreversible water withdrawal and setting of environmental flow. Moscow: Ekonomika i Informatika, 2001. 118 p. (In Russ.).
13. Dubinina V.G., Kosolapov A.E., Koronkevich N.I., Chebanov M.S., Skachedub E.A. Methodological approaches to the environmental regulation of irreversible river water withdrawal and establishment of environmental flow. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2009. No. 3. P. 26–61. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2009-3-26-61.

14. Fashchevsky B.V., Burlibaev M.Zh., Opp K., Burlibaeva D.M. On the concept of scientific justification of the methodology for regulating the environmental and potentially available flow of rivers in Kazakhstan. *Hydrometeorology and Ecology*. 2012. No. 4. P. 66–100. (In Russ.).
15. Burlibaev M.Zh., Burlibaeva D.M. Conceptual foundations for regulating the environmental and available flow of rivers in Kazakhstan. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2020. No. 5. P. 52–73. (In Russ.) https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-5-52-73.
16. Magritsky D.V. New results in determining the environmental flow of the Lower Ural. Steppes of Northern Eurasia: Proceedings of the 10th International Symposium, 2024, No. X. [Electronic resource]. (In Russ.) URL: https://orensteppe.org/content/novye-rezultaty-opredeleniya-ekologicheskogo-stoka-nizhnego-urala.
17. Korlyakov K.A. Ichthyofauna of the Chelyabinsk Region: Revision 2008–2018. *Ecology, Nature Management and Resources of the Urals.* 2019. No. 2 (2). P. 4–9. (In Russ.).
18. Chibilev A.A., Debelo P.V. Fishes of the Ural-Caspian Region. Series: Natural Diversity of the Ural-Caspian Region. Ekaterinburg, 2009. Vol. 2. 229 p. (In Russ.).
19. Alekhina G.P., Verkhoshentseva Yu.P., Shamraev A.V., Khardikova S.V. Composition of phytoplankton as an indicator of the ecological state of the middle reaches of the Ural River and its tributaries. *AgroEcoInfo*. 2021. No. 6 (48). (In Russ.).
20. Kazgiprovodkhoz Institute Consortium. Comprehensive scheme for the use and protection of water resources of the Ural (Zhayik) River and its tributaries / L.A. Maly, D.G. Rymkulova, G.A. Safonov et al. Almaty, 2007. Report in 6 volumes and 11 books. (In Russ.).
21. Kozlova M.A., Sivochip Zh.T. Assessment of Water Quality Dynamics in the Transboundary Ural River Basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2022. No. 6. P. 107–119. (In Russ.) https://doi.org/10.35567/1999-4508-2022-6-107-119.

Сведения об авторах:

Никитина Оксана Игоревна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, отдел информационного обеспечения управления водохозяйственными системами, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 109462, г. Москва; ORCID: 0000-0001-6627-3237; e-mail: oxana.niki@yandex.ru

Косолапов Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, директор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, 10а; ORCID: 0000-0002-0440-9036; e-mail: akosol@mail.ru

About the authors:

Oxana I. Nikitina, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Department of Information Support for Water Resources Management, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (RosNIIVKh), Russia, 109462, Moscow; ORCID: 0000-0001-6627-3237; e-mail: oxana.niki@yandex.ru

Aleksey E. Kosolapov, Doctor of Technical Sciences, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (RosNIIVKh), Russia, 344037, Rostov-on-Don, 10a Chentsova Street; ORCID: 0000-0002-0440-9036; e-mail: akosol@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 28.05.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 11.06.2025.
Принята к публикации / Accepted 10.07.2025.

УДК 556; 470.43 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-25-43*

Повышение уровня воды Куйбышевского водохранилища в условиях климатических изменений

А.В. Селезнева, В.А. Селезнев

seleznev53@mail.ru

Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Тольятти, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В условиях глобального потепления климата оценка изменения гидрологического режима водохранилищ Волжско-Камского каскада, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, рыбного хозяйства и рекреации, весьма актуальна. В качестве объекта исследования выбрано самое крупное в каскаде Куйбышевское водохранилище с сезонным регулированием водного стока Волги. Основная цель – количественная оценка межгодовых и сезонных изменений уровня воды водохранилища за период 1958–2024 гг. **Методы.** Для исследования создана база данных инструментальных наблюдений за уровнем воды водохранилища и расходом воды в створе Жигулевского гидроузла, через который проходит 97 % водного стока р. Волги. При обработке исходного материала использованы методы статистического анализа временных рядов, включающие регрессионный и корреляционный анализы. Достоверность оценок определялась с помощью критерия Фишера. **Результаты.** Установлена устойчивая тенденция повышения среднего уровня воды Куйбышевского водохранилища за счет увеличения уровня воды в зимнюю межень и весеннее половодье. В соответствии с линейным трендом среднегодовой уровень воды за 67-летний период повысился на 0,93 м при темпе 0,14 м/10 лет. Между уровнем воды в водохранилище и расходом воды р. Волги установлена связь с коэффициентом корреляции 0,55. Изменение уровня воды по гидрологическим сезонам крайне неравномерно. Повышение уровня воды за 67-летний период также происходило неравномерно. Основным фактором повышения уровня воды является смена режима сезонного регулирования водного стока Волги в створе Жигулевского гидроузла. В результате амплитуда сезонных колебаний уровня воды уменьшилась в два раза с 4,6 м до 2,3 м за счет его значительного повышения в зимнюю межень и весеннее половодье. Столь существенные изменения уровня воды в период зимней межени и в начале весеннего половодья привели к изменению морфометрических характеристик Куйбышевского водохранилища. Наибольшее увеличение площади и объема водохранилища наблюдалось в марте и составило 26 % и 32 % соответственно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: р. Волга, Куйбышевское водохранилище, уровень воды, климатические изменения, влияние водности, сезонное регулирование, морфометрия водоема.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер 1024032700087-2-1.6.19;1.6.17.

Для цитирования: Селезнева А.В., Селезнев В.А. Повышение уровня воды Куйбышевского водохранилища в условиях климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 25–43. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-25-43; EDN: EXMLTZ

© Селезнева А.В., Селезнев В.А., 2025

The Kuibyshev Reservoir water level increasing in the context of the climate change

Aleksandra V. Selezneva, Vladimir A. Seleznev

seleznev53@mail.ru

Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Tolyatti, Russia

ABSTRACT

Relevance. Assessing the change in the hydrological regime of the reservoirs of the Volga-Kama cascade is very relevant in the context of global warming. Reservoirs are used for domestic and drinking water supply, fisheries and recreation. The largest in the cascade, the Kuibyshev Reservoir, was chosen as the object of study. It is characterized by a seasonal regime of regulation of the Volga water flow. The main objective is to quantify interannual and seasonal changes in the reservoir water level for the period from 1958 to 2024. Relevance. **Methods.** The institute has created a database of instrumental observations of the reservoir water level and water flow in the Zhigulevsky hydroelectric complex. 97% of the Volga River's water flow passes through the hydroelectric complex. The source material was processed using the method of statistical analysis of time series. We conducted regression and correlation analyses. The reliability of the estimates was determined using Fisher's criterion. **Results.** The stable trend of increasing the average water level of the Kuibyshev Reservoir was formed due to the increase in the water level during the winter low water period and spring flood. The average annual water level increased by 0.93 m over the 67-year period. The rate of increase was 0.14 m/10 years, in accordance with a linear trend. A connection has been established between the water level in the reservoir and the water flow of the Volga River. The correlation coefficient is 0.55. Changes in water levels across hydrological seasons occurred extremely unevenly. The water level increased most significantly during the winter low water period by 1.88 m at a rate of 0.28 m/10 years. The water level rose by 1.30 m during the spring flood. The rate of increase was 0.20 m/10 years. The water level remained virtually unchanged during the summer-autumn low water period. The main factor in the increase in water levels is the change in the seasonal regulation of the Volga River water flow at the Zhiguli hydroelectric complex. As a result, the amplitude of seasonal fluctuations in water levels decreased by half, from 4.6 m to 2.3 m, due to a significant increase in water levels during the winter low water period and spring flood. Such significant changes in the water level during the winter low water period (December-February) and the beginning of the spring flood (March, April) led to changes in the morphometric characteristics of the Kuibyshev Reservoir. The largest increase in the area and volume of the reservoir occurred in the month of March and amounted to 26 % and 32 %, respectively.

KEYWORDS: the Volga River, Kuibyshev reservoir, water level, climate change, water content impact, seasonal regulation, reservoir morphometry.

Financing: The study was carried out within the framework of a state assignment, registration number 1024032700087-2-1.6.19;1.6.17.

For citation: Selezneva A.V., Seleznev V.A. The Kuibyshev Reservoir water level increasing in the context of the climate change // *Water management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 4. P. 25–43. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-25-43; EDN: EXMLTZ

ВВЕДЕНИЕ

Современная оценка межгодовых и сезонных изменений уровня воды Куйбышевского водохранилища в условиях многолетних колебаний водности р. Волги актуальна и необходима для исследования экологического состояния водного объекта, используемого для водоснабжения, рыбного хозяйства и рекреации. Динамика уровня воды оказывает существенное влияние на формирование ее качества и состояние водных биологических ресурсов водохранилища.

Изучение гидрологического режима и, в частности, уровня воды Куйбышевского водохранилища началось в 1957 г. с момента создания Жигулевского гидроузла (замыкающего створ водохранилища) и затем продолжилось при введении в строй Чебоксарского (на р. Волге) и Нижнекамского (на р. Каме) гидроузлов, которые являются входными створами для Куйбышевского водохранилища. За период 1957–1980 гг. основные закономерности межгодовых и сезонных изменений уровня воды водохранилища в основном исследованы, включая особенности динамики уровня воды в годы различной водности [1, 2].

До конца XX в. в условиях интенсивного развития хозяйственной деятельности исследователи пристальное внимание уделяли оценке изменения гидрологического режима водных объектов в связи с увеличивающимся антропогенным воздействием [3–6]. В целом по России уже дана количественная оценка антропогенного влияния на водные ресурсы. Установлено, что под влиянием хозяйственной деятельности произошло уменьшение годового стока Волги на 5 %. Только за счет безвозвратного водопотребления и влияния водохранилищ уменьшение речного стока оценивается в 1 % величины среднего многолетнего стока. Однако в ряде речных бассейнов, особенно в южной части Европейской территории России, это уменьшение значительно выше [7].

В современный период на первый план выдвигаются вопросы изменения гидрологического режима водных объектов в связи с глобальным потеплением климата [8–9]. Наиболее очевидным откликом на глобальное потепление является региональное повышение температуры и влажности воздуха. Подобные изменения климата способствовали активизации исследований по изучению изменений гидрологического режима водных объектов [10–12].

По результатам исследований установлено, что приземная температура воздуха повышается и увеличивается количество осадков. Положительные изменения средних годовых и особенно зимних температур воздуха, а также атмосферных осадков оказали значительное влияние на водность рек и режим их стока. На значительной части средней полосы Европейской территории России годовой сток рек в последние десятилетия превысил норму периода 1940–1969 гг. Основной особенностью современного водного режима рек является существенное изменение внутригодового режима с увеличением меженного стока, особенно зимнего [13].

Исследования изменения водного стока рек под воздействием климата уже проводятся в бассейнах Дона [14] и Волги [15], осуществляются модельные расчеты стока [16], обсуждаются вопросы о соотношении климатических и

антропогенных факторов, оказывающих влияние на изменение стока р. Волги [17, 18]. Установлено, что в бассейне Волги климатические изменения способствовали повышению увлажнения территории, что привело к существенному улучшению условий формирования водного стока. Особенно ощутимо это проявилось в 1990-е годы, когда увеличение речного стока отмечено по всей территории России [12]. Например, с 1976 по 2023 г. среднегодовой водный сток р. Волги в створе Жигулевского гидроузла увеличился на 10 % по сравнению с периодом 1958–1975 гг., до начала современных климатических изменений на региональном уровне [19].

Наряду с изучением влияния климата на водный сток рек актуальным направлением является исследование влияния климата на режим уровня воды крупных равнинных водохранилищ. В представленной работе проведена оценка изменения уровня воды самого крупного в Волжско-Камском каскаде Куйбышевского водохранилища с момента его создания и по настоящее время (1958–2024 гг.) в условиях многолетних колебаний водности р. Волги на фоне глобального потепления климата. Полученные результаты исследований могут быть использованы при оценке качества воды и состояния водных биологических ресурсов водохранилища на фоне современных климатических изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полезный объем Куйбышевского водохранилища позволяет осуществлять сезонное, недельное и суточное регулирование водного стока реки в интересах широкого круга водопользователей на Средней и Нижней Волге. Водохранилище впервые было наполнено в 1957 г. до нормального подпорного уровня (НПУ), который составляет 53,0 м Балтийской системы. Через выходной створ Куйбышевского водохранилища (Жигулевский гидроузел) проходит 97 % стока Волги. Протяженность водохранилища с севера на юг составляет более 500 км, наибольшая ширина – 40 км, наибольшая глубина – 40 м. Площадь водохранилища при НПУ – 6 150 км^2, полный объем – 57,3 км^3, полезный объем – 30,7 км^3.

Эксплуатирующая организация Жигулевского гидроузла – Филиал ОАО «РусГидро» – «Жигулевская ГЭС». Первый нормативный документ использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища разработан в 1957 г., позднее к нему были составлены уточнения и дополнения с учетом накопленного опыта и новых обстоятельств по созданию других водохранилищ: Волгоградского (1961–1962 гг.), Саратовского (1968 г.), Чебоксарского (1981 г.) и Нижнекамского (1978–1979 гг.). В настоящее время использование водных ресурсов Куйбышевского водохранилища регламентируется нормативным документом «Основные правила использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища на р. Волге», утвержденным приказом Министерства мелиорации и водного хозяйства РСФСР от 11 ноября 1983 г. № 596.

Для формирования базы данных по уровню воды Куйбышевского водохранилища и расходу воды Волги в створе Жигулевского гидроузла за период

1958–2024 гг. использованы материалы ОАО «РусГидро» и Приволжского УГМС, включающие:

– справочные издания «Гидрологический ежегодник», подготовка которых до 1979 г. осуществлялась Гидрометеорологической службой СССР;

– кадастровые справочные издания «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» УГМС Росгидромета, начиная с 1980 г.

Для исследования многолетних изменений уровня воды использованы методы статистического анализа данных систематических наблюдений на гидрологическом посту (г/п) Тольятти. Водомерный пост расположен на Приплотинном плесе и действует с момента заполнения Куйбышевского водохранилища. Измерения уровня воды осуществляются на основе рейки ГМ-ЗУ два раза в сутки с дополнительным использованием самописца типа «Валдай». Наблюдения на г/п Тольятти являются репрезентативными для основной акватории водохранилища.

На Куйбышевском водохранилище при анализе гидрологических условий обычно выделяют зимнюю межень, весеннее половодье и летне-осеннюю межень. Зимняя межень продолжается с декабря по март. В это время расход воды в замыкающем створе водохранилища стабилен, полезная емкость водохранилища постепенно срабатывается. Весеннее половодье наблюдается с апреля по июнь, расходы воды резко увеличиваются, идет интенсивное наполнение водохранилища до нормального подпорного уровня. Как правило, в мае наступает пик весеннего половодья, а в июне – снижение расходов воды. Летне-осенняя межень проходит с июля по ноябрь, расходы воды меняются незначительно [20].

Сформированные ряды многолетних данных по гидрологическим сезонам подвергнуты статистической обработке с использованием стандартных пакетов Statistica и Excel. Оценка однородности (стационарности) гидрологических рядов, обобщенных с учетом особенностей гидрологической информации, выполнена на основе критерия Фишера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам анализа данных установлено, что за период 1958–2024 гг. наметилась тенденция повышения уровня воды Куйбышевского водохранилища. Среднегодовой уровень воды за 67 лет повысился на 0,94 м, с 50,71 до 51,65 м БС в соответствии с положительным линейным трендом. Темп повышения уровня составил 0,14 м/10 лет. Повышение среднегодового уровня воды произошло за счет существенного повышения наименьших уровней воды при практически неизменных значениях наибольших уровней. Наименьший уровень воды повысился на 2,71 м, с 47,42 до 50,13 м. Скорость повышения уровня воды составила 0,40 м/10 лет. Наибольший уровень воды повысился всего на 0,20 м, с 52,74 м до 52,94 м при темпе повышения 0,03 м/10 лет (рис. 1).

По гидрологическим сезонам повышение среднегодового уровня воды происходило крайне неравномерно: наблюдалось существенное увеличение уровня в период зимней межени и весеннего половодья. За 67-летний период в зимнюю межень уровень воды повысился на 1,88 м, с 49,03 до 50,91 м. Темп

увеличения уровня воды составил 0,28 м/10 лет. В период весеннего половодья уровень воды увеличился на 1,30 м, с 50,93 до 52,23 м при темпе 0,20 м/10 лет. В период летне-осенней межени он оставался практически неизменным на уровне 51,99 м. Следовательно, среднегодовой уровень воды водохранилища повысился за счет повышения уровня воды в зимнюю межень и весеннее половодье.

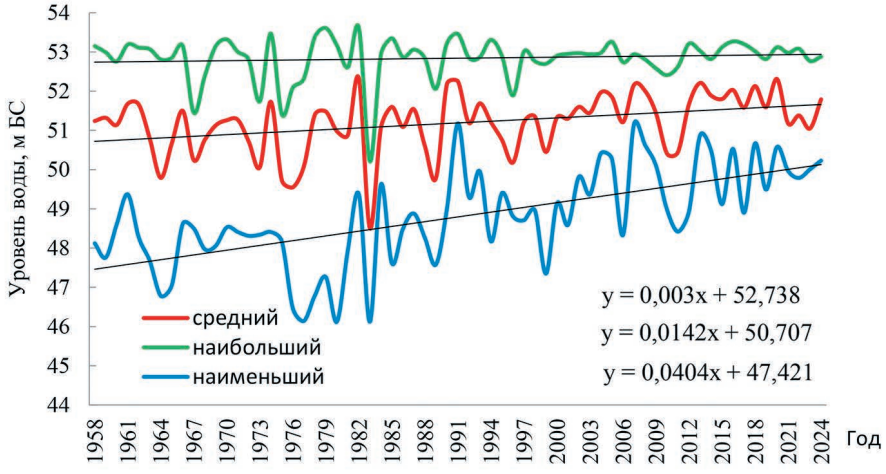


Рис. 1. Изменение среднего, наибольшего и наименьшего уровней воды в Куйбышевском водохранилище за период 1958–2024 гг. на фоне линейных трендов.
Fig. 1. Changes in average, highest and lowest water levels for the period 1958–2024 against the background of linear trends.

Аномально высокий среднегодовой уровень воды наблюдался в 1982 г. и составил 52,32 м, аномально низкий – 48,51 м – отмечен в 1983 г. Амплитуда колебаний уровня воды составила 3,81 м. К периодам с относительно низким стоянием уровня воды (< 50,0 м) относятся 1964, 1973, 1975, 1976, 1977, 1983 и 1989 годы, которые входят в период до начала 1990-х годов. Относительно высокий уровень воды (> 52,0 м) наблюдался в 1982, 1990, 1991, 2007, 2008, 2013, 2016, 2019, 2020 годы.

Несмотря на значительное повышение уровня воды (H), среднегодовой расход воды (Q) увеличился с 7 554 м^3/с до 7 754 м^3/с – всего на 200 м^3/с в соответствии с положительным линейным трендом. Темп увеличения – 30 м^3/с за 10 лет. Наименьший расход воды составил 5 270 м^3/с и наблюдался в 1975 г. Наибольший расход воды – 10 431 м^3/с – отмечен в 1990 г. К годам с низкой водностью (< 6 000 м^3/с) относятся 1967, 1973, 1975, 1976, 1977, 1996-й. К периодам высокой водности (> 9 000 м^3/с) – 1966, 1979, 1985, 1986, 1990, 1991, 1994, 2020 годы. Наибольший средний годовой расход воды превышает наименьший в два раза.

Совместный анализ многолетней динамики среднегодовых значений уровня (H) и расхода (Q) воды показал, что тенденции их изменений совпадают, а вот темпы существенно отличаются (рис. 2). Между H и Q существует

положительная линейная связь с коэффициентом корреляции 0,55, что характеризует тесноту связи как среднюю. Выдвинуто предположение, что повышение уровня воды Куйбышевского водохранилища обусловлено увеличением водности р. Волги в условиях глобальных климатических изменений. За период с 1976 по 2023 г. среднегодовой водный сток реки увеличился на 10 % по сравнению с маловодным периодом (1958–1975 гг.), наблюдавшимся до начала современных климатических изменений. На Волге не осуществляется многолетнее регулирование водного стока, следовательно, многолетние изменения водного стока обусловлены главным образом климатическими изменениями [19].

Для оценки статистической значимости (достоверности) тренда уровня воды по критерию Фишера был определен коэффициент детерминации, который составляет 0,14 и показывает вклад линейного тренда в общую изменчивость уровня воды. Сравнение фактического и табличного значений критерия Фишера позволяет сделать вывод о статистической значимости определенного тренда.

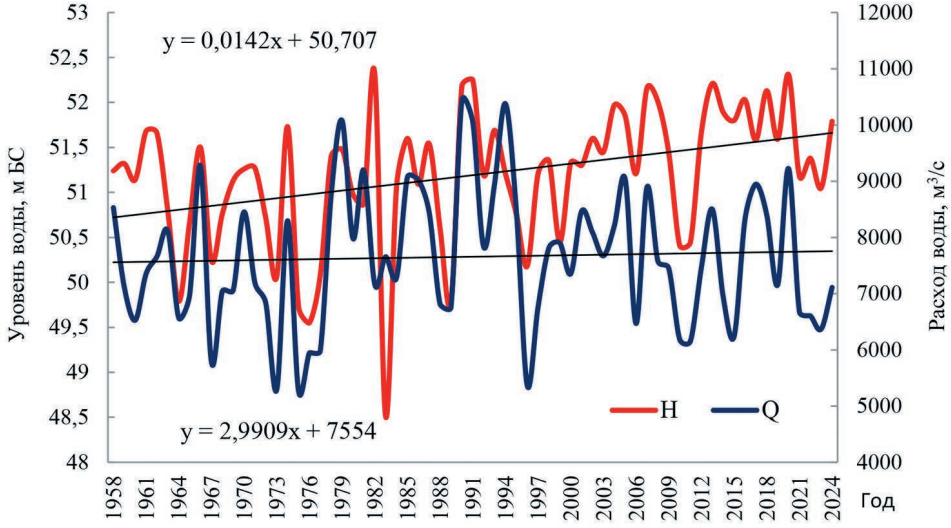


Рис. 2. Изменение среднего уровня и расхода воды в Куйбышевском водохранилище за период 1958–2024 гг. на фоне линейных трендов.
Fig. 2. Change in average water level and discharge for the period 1958-2024 against the background of linear trends.

Учитывая, что при повышении уровня воды Куйбышевского водохранилища задействованы значительные объемы воды, влияние других факторов (помимо климатического), как, например, снижение безвозвратного водопотребления или уменьшение емкости водохранилища за счет заиления наносами, следует рассматривать как второстепенные.

За 67-летний период изменение уровня воды в Куйбышевском водохранилище происходило по-разному. В начале периода уровень воды снижался, в середине периода оставался практически неизменным, а затем наблюдалось

его резкое повышение. Временной ряд изменения уровня воды Куйбышевского водохранилища (рис. 1) характеризуется как нестационарный. Для более детального анализа и получения достоверных статистических характеристик на различных временных отрезках 67-летний ряд разделен на три практически одинаковых по продолжительности периода: 1958–1979 гг., 1980–2001 гг., 2002–2024 гг.

Период 1958–1979 гг. характеризуется относительно низким уровнем воды, в среднем 50,87 м. Наибольший уровень воды за исследуемый период составил 51,73 м и наблюдался в 1974 г., наименьший – 49,55 м – отмечен в 1976 г. За 22 года амплитуда среднегодовых колебаний уровня воды составила 2,18 м (стандарт – 0,68 м), коэффициент вариации – 0,12 (табл. 1).

Если оценивать период 1958–1979 гг. по водности р. Волги, то его следует характеризовать как маловодный. Средний расход воды составил 7 276 м^3/с, наибольший – 10 076 м^3/с – наблюдался в 1979 г., а наименьший расход воды – 5 270 м^3/с – зафиксирован в 1975 г. Амплитуда среднегодовых колебаний расхода воды составила 4 806 м^3/с (стандарт – 1 272 м^3/с), коэффициент вариации – 0,17 (табл. 1).

Таблица 1. Изменение статистических характеристик уровня и расхода воды в Куйбышевском водохранилище по гидрологическим сезонам и за год в период 1958–1979 гг.

Table 1. Changes in the Kuybyshev Reservoir water level and flow statistical characteristics by hydrological seasons and per year in the 1958–1979 period

Характеристика	Зимняя межень	Весеннее половодье	Летне-осенняя межень	Год
Уровень воды, м БС				
Средний	49,35	51,17	51,91	50,87
Наибольший	50,36	52,61	53,04	51,73
Наименьший	47,28	49,27	49,62	49,55
Амплитуда	3,08	3,34	3,42	2,18
Стандарт	0,91	0,82	0,87	0,68
Вариация	0,21	0,13	0,13	0,12
Расход воды, м^3/с				
Средний	5 741	12 583	5 320	7 276
Наибольший	7 875	19 560	8 588	10 076
Наименьший	4 368	7 440	3 592	5 270
Амплитуда	3 507	12 120	4 996	4 806
Стандарт	950	3 416	1 082	1 272
Вариация	0,17	0,27	0,20	0,17

По гидрологическим сезонам уровень воды в 1958–1979 гг. изменялся следующим образом: в зимнюю межень был самым низким – 49,35 м, за время весеннего половодья повысился на 1,82 м и составил 51,17 м, самый большой уровень воды наблюдался в летне-осеннюю межень – 51,91 м. Амплитуда сезонных колебаний уровня воды составила: 3,08 м – в зимнюю межень, 3,34 м – в весеннее половодье и 3,42 м – в летне-осеннюю межень. Разница между уровнем воды в зимнюю и летне-осеннюю межень – 2,56 м.

Расход воды в зимнюю межень отмечен на уровне 5 741 м^3/с, что больше на 421 м^3/с, чем в летне-осеннюю межень. В весеннее половодье отмечен расход воды (12 583 м^3/с) в 2,4 раза выше по сравнению с летней меженью. Амплитуда сезонных колебаний расхода воды составила: 3 507 м^3/с – в зимнюю межень; 12 120 м^3/с – в весеннее половодье и 4 996 м^3/с – в летне-осеннюю межень.

В соответствии с линейным трендом в течение 1958–1979 гг. наблюдалась отрицательная тенденция изменения уровня воды, который за 22 года понизился на 0,66 м (рис. 3). Тенденция понижения сохранялась во все гидрологические сезоны. В зимнюю межень уровень воды понизился на 0,92 м, в весеннее половодье – на 0,32 м, в летне-осеннюю межень – на 0,67 м.

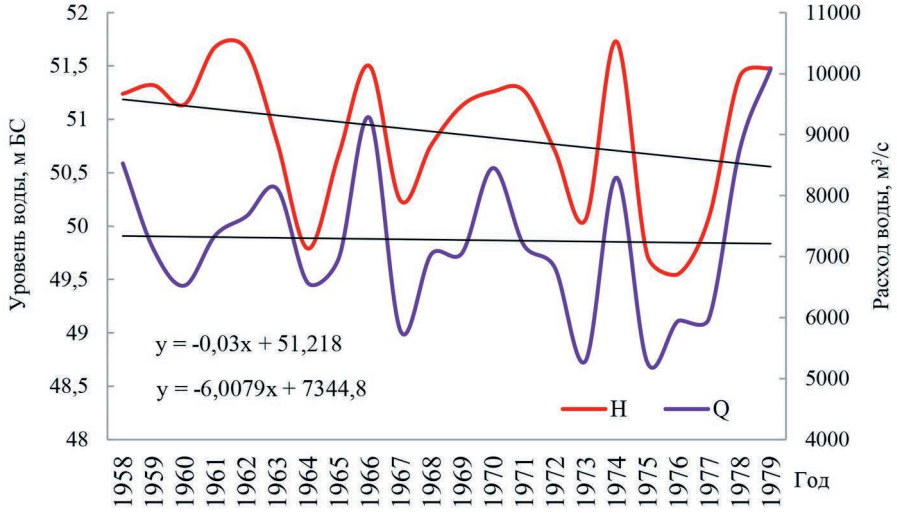


Рис. 3. Изменения уровня (H) и расхода (Q) воды в Куйбышевском водохранилище в период 1958–1979 гг. на фоне линейных трендов.
Fig. 3. Changes in the Kuybyshev Reservoir water level (H) and flow (Q) in the 1958–1979 period against the background of linear trends.

Понижение уровня воды в Куйбышевском водохранилище за период 1958–1979 гг. происходило на фоне уменьшения расхода воды р. Волги в створе Жигулевского гидроузла. За 22 года средний расход воды уменьшился на 132 м^3/с (рис. 3). Изменение уровня воды в водохранилище в основном согласуются с изменениями расхода воды Волги, за исключением периода 1959–1961 гг., когда ход уровня и расхода воды изменялся в противофазе.

Между значениями уровня воды Куйбышевского водохранилища и расхода воды р. Волги установлена положительная линейная связь с коэффициентом корреляции 0,77. Сильная корреляционная связь позволяет предположить, что снижение расхода воды р. Волги обусловило понижение уровня воды в период 1958–1979 гг. Однако обращает на себя внимание тот факт, что при наличии однонаправленных тенденций изменения уровня и расхода воды углы наклона линий их тренда существенно отличаются (рис. 3). Угол наклона линии тренда уровня воды значительно больше, чем расхода воды. Темп понижения уровня воды составляет 0,3 м/10 лет, а темп уменьшения расхода воды – 60 м^3/с за 10 лет.

Период 1980–2001 гг. характеризуется как период среднего стояния уровня воды: в водохранилище он повысился на 0,20 м по сравнению с предыдущим периодом. Средний уровень составил 51,07 м, наибольший – 52,32 м – наблюдался в 1982 г., наименьший – 48,51 м – в 1983 г. Амплитуда среднегодовых колебаний уровня воды увеличилась по сравнению с периодом 1958–1979 гг. и составила 3,81 м, стандарт – 1,07 м, а коэффициент вариации – 0,14 (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики уровня и расхода воды в Куйбышевском водохранилище в период 1980–2001 гг.
Table 2. Characteristics of the Kuybyshev Reservoir water level and flow in the 1980–2001 period

Характеристика	Зимняя межень	Весеннее половодье	Летне-осенняя межень	Год
Уровень воды, м БС				
Средний	49,81	51,47	51,81	51,07
Наибольший	52,40	53,16	53,13	52,32
Наименьший	46,93	50,02	49,54	48,51
Амплитуда	5,47	3,14	3,59	3,81
Стандарт	1,07	0,89	0,92	1,07
Вариация	0,22	0,14	0,14	0,14
Расход воды, м^3/с				
Средний	6 191	13 522	6 482	8 145
Наибольший	7 843	19 700	9 330	10 431
Наименьший	4 413	7 383	4 829	5 369
Амплитуда	3 430	12 317	4 501	5 062
Стандарт	1 062	3 302	1 139	1 267
Вариация	0,17	0,24	0,18	0,16

Если оценивать период 1980–2001 гг. по водности Волги, его следует характеризовать как многоводный: средний расход воды по сравнению с предыдущим периодом увеличился на 869 м³/с (12 %) и составил 8 145 м³/с. Наибольший расход – 10 431 м³/с – наблюдался в 1990 г., наименьший – 5 369 м³/с – в 1996 г. Амплитуда среднегодовых колебаний расхода воды составила 5 062 м³/с, стандарт – 1 267 м³/с, коэффициент вариации – 0,16 (табл. 2).

По гидрологическим сезонам средний уровень воды в 1980–2001 гг. изменялся следующим образом: в зимнюю межень он составил 49,81 м, в весеннее половодье – 51,47 м, в летне-осеннюю межень – 51,81 м. Амплитуда колебаний уровня воды в зимнюю межень составляла 5,47 м, в весеннее половодье – 3,14 м, в летне-осеннюю межень – 3,59 м. Разница между уровнем воды в зимнюю и летне-осеннюю межень сократилась до 2,0 м.

Расход воды в зимнюю межень отмечен на уровне 6 191 м³/с, в весеннее половодье – 13 522 м³/с, в летне-осеннюю межень – 6 482 м³/с. Амплитуда колебаний уровня воды составила: 3 430 м³/с – в зимнюю межень, 12 317 м³/с – в весеннее половодье и 4 501 м³/с – в летне-осеннюю межень. Расход воды в летне-осеннюю межень на 291 м³/с больше, чем в зимнюю межень.

В течение 1980–2001 гг. за 22 года средний уровень воды повысился на 0,31 м, с 50,86 до 51,17 м в соответствии с линейным трендом (рис. 4). При этом тенденции изменения уровня воды в разные гидрологические сезоны отличались. За время зимней межени уровень воды повысился на 0,51 м, с 49,55 до 50,06 м. В течение весеннего половодья уровень воды вырос на 0,89 м, с 50,00 до 50,89 м. Тенденция изменилась в летне-осеннюю межень, когда уровень воды понизился на 0,31 м, с 51,97 до 51,66 м. Ход уровня воды согласуется с ходом расхода воды р. Волги, за исключением периода 1959–1961 гг.

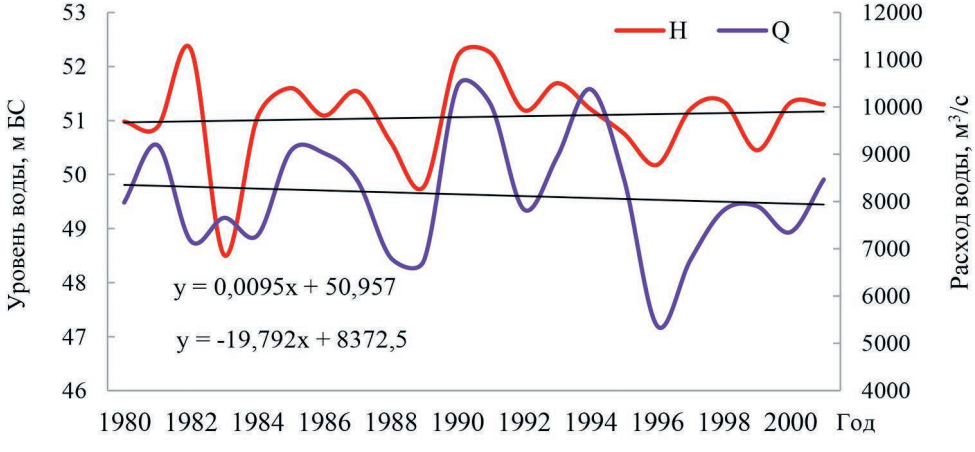


Рис. 4. Изменения уровня (H) и расхода (Q) воды в Куйбышевском водохранилище в период 1980–2001 гг. на фоне линейных трендов.
Fig. 4. Changes in the Kuybyshev Reservoir water level (H) and flow (Q) in the 1980–2001 period against the background of linear trends.

В 1980–2001 гг. отмечена тенденция повышения среднего уровня воды Куйбышевского водохранилища на фоне понижения расхода воды р. Волги. За 22 года уровень воды в водохранилище повысился на 0,31 м, а расход воды, наоборот, уменьшился на 435 м^3/с (5,2 %), с 8 373 до 7 938 м^3/с в соответствии с линейным трендом (рис. 4). Несмотря на разные тенденции изменения уровня и расхода воды, между ними установлена умеренная положительная линейная связь с коэффициентом корреляции 0,47. Следовательно, в течение периода 1980–2001 гг. водность Волги не являлась фактором повышения уровня воды в водохранилище. Вероятнее всего, уровень воды Куйбышевского водохранилища повышался за счет сезонного регулирования водного стока р. Волги в створе Жигулевского гидроузла.

Период 2002–2024 гг. характеризуется высоким уровнем воды в Куйбышевском водохранилище. По сравнению с предыдущим периодом средний уровень воды повысился на 0,55 м и составил 51,62 м. Наибольший уровень – 52,31 м – наблюдался в 2020 г., а наименьший – 50,37 м – в 2010 г. За 23 года амплитуда среднегодовых колебаний уровня воды составила 2,01 м, стандарт – 0,51 м, коэффициент вариации – 0,08 (табл. 3).

Таблица 3. Характеристики уровня и расхода воды в Куйбышевском водохранилище в период 2002–2024 гг.
Table 3. Characteristics of the Kuybyshev Reservoir water level and flow in the 2002–2024 period

Характеристика	Зимняя межень	Весеннее половодье	Летне-осенняя межень	Год
Уровень воды, м БС				
Средний	50,79	52,12	51,98	51,62
Наибольший	52,14	52,96	52,95	52,31
Наименьший	48,85	50,67	50,06	50,41
Амплитуда	3,29	2,29	2,89	2,01
Стандарт	0,84	0,54	0,69	0,51
Вариация	0,15	0,08	0,10	0,08
Расход воды, м^3/с				
Средний	5 926	12 728	5 746	7 551
Наибольший	7 557	16 833	8 182	9 224
Наименьший	4 689	8 339	4 017	6 159
Амплитуда	2 868	8 494	4 165	3 065
Стандарт	868	2 608	842	1 004
Вариация	0,15	0,20	0,15	0,13

Если оценивать период 2002–2024 гг. по водности р. Волги, его следует характеризовать как период средней водности. Средний расход воды составил 7 551 м^3/с и уменьшился в сравнении с 1980–2001 гг. на 594 м^3/с (7,3 %). Наибольший расход воды – 9 224 м^3/с – наблюдался в 2020 г., наименьший – 6 159 м^3/с – в 2011 г. За 23 года амплитуда колебаний расхода воды составила 3 065 м^3/с, стандарт – 1 004 м^3/с, коэффициент вариации – 0,13 (табл. 3).

По гидрологическим сезонам средний уровень воды в 2002–2024 гг. изменялся следующим образом: в зимнюю межень он составил 50,79 м, в весеннее половодье – 52,12 м, в летне-осеннюю межень – 51,98 м. Амплитуда колебаний уровня воды: в зимнюю межень – 3,29 м, во время весеннего половодья – 2,29 м, в летне-осеннюю межень – 2,89 м. Разница между уровнем воды в зимнюю и летне-осеннюю межень существенно сократилась и составила 1,19 м.

Средний расход воды отмечен на уровне 5 926 м^3/с в зимнюю межень, 12 728 м^3/с – в весеннее половодье и 5 746 м^3/с – в летне-осеннюю межень. Амплитуда колебаний уровня воды составила: 2 868 м^3/с в зимнюю межень, 8 494 м^3/с в весеннее половодье и 4 165 м^3/с в летне-осеннюю межень. В период 2002–2024 гг. расход воды в зимнюю межень был на 180 м^3/с больше, чем в летне-осеннюю.

За 23 года средний уровень воды, в соответствии с линейным трендом, практически не менялся (рис. 5). Однако тенденции изменения уровня воды в различные гидрологические сезоны различались: в зимнюю межень уровень воды практически не менялся, в весеннее половодье повысился на 0,23 м, а в летне-осеннюю межень понизился на 0,23 м в соответствии с линейными трендами.

В 2002–2024 гг. стабильность среднегодового уровня воды Куйбышевского водохранилища не согласовывалась с уменьшением водности Волги. Средний расход воды реки уменьшился на 728 м^3/с (9 %), с 7 931 до 7 203 м^3/с в соответствии с линейным трендом (рис. 5). Вероятнее всего, стабильность уровня воды в Куйбышевском водохранилище в 2002–2024 гг. достигалась регулированием водного стока р. Волги в створе Жигулевского гидроузла.

Подводя итоги совместного анализа изменений уровня воды в Куйбышевском водохранилище и расхода воды р. Волги, приходим к выводу, что их тенденции изменения не всегда совпадают. Уровень воды в водохранилище от периода к периоду только повышался, а расход воды от периода 1958–1979 гг. к периоду 1980–2001 гг. увеличивался, а от периода 1980–2001 гг. к периоду 2002–2024 гг., наоборот, уменьшался. Очевидно, что объяснить повышение уровня воды Куйбышевского водохранилища только динамикой водности Волги в условиях климатических изменений не представляется возможным.

Предполагается, что основным фактором повышения уровня воды Куйбышевского водохранилища является смена режима сезонного регулирования водного стока р. Волги в створе Жигулевского гидроузла. Смена режима сезонного регулирования обусловлена наметившейся тенденцией уменьшения водности Волги в современный период 2002–2024 гг. Анализ сезонной изменчивости уровня воды по трем периодам показал, что в 1980–2001 гг. произошла небольшая, а в период 2002–2024 гг. значительная трансформация сезонной изменчивости уровня воды в Куйбышевском водохранилище (рис. 6).

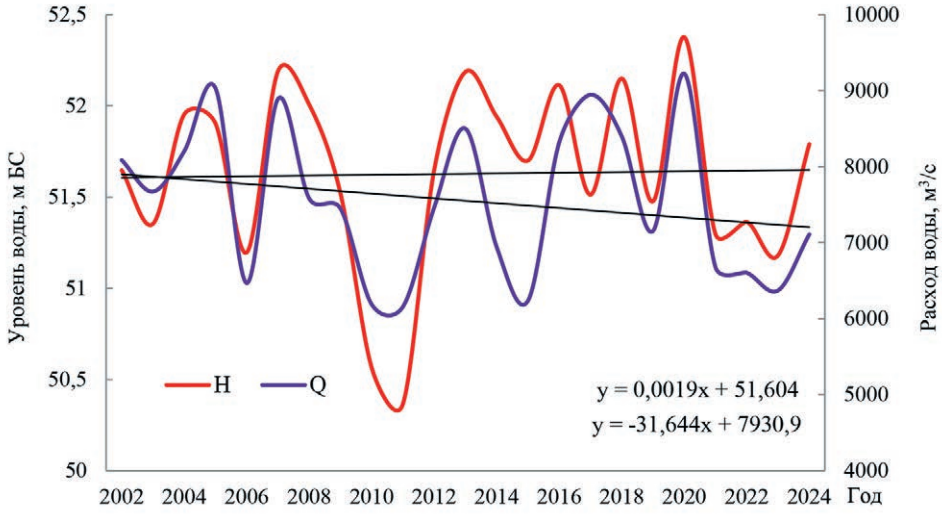


Рис. 5. Изменения уровня (H) и расхода (Q) воды в Куйбышевском водохранилище в период 2002–2024 гг. на фоне линейных трендов.
Fig. 5. Changes in the Kuybyshev Reservoir water level (H) and flow (Q) in the 2002–2024 period against the background of linear trends.

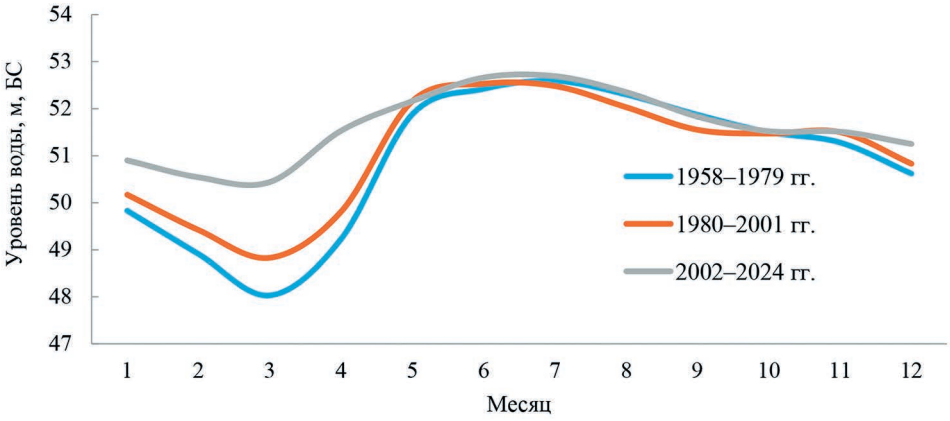


Рис. 6. Динамика сезонной изменчивости уровня воды в Куйбышевском водохранилище в различные периоды.
Fig. 6. Dynamics of the Kuybyshev Reservoir water level seasonal variability in different periods.

Трансформация сезонной изменчивости затронула только период с января по апрель. Амплитуда сезонных колебаний уровня воды составила 4,6 м в 1958–1979 гг., в 1980–2001 гг. – 4,1 м, а в 2002–2024 гг. – 2,3 м. Амплитуда сезонных колебаний в период 2002–2024 гг. уменьшилась на 2,3 м по сравнению с 1958–1979 гг. Наиболее существенное уменьшение амплитуды произошло за счет увеличения уровней воды в марте перед началом весеннего половодья.

В результате увеличения уровня воды в современный период изменились морфометрические показатели Куйбышевского водохранилища. В соответствии с интерполяционными данными для расчета морфометрических характеристик в «Основных правилах использования водных ресурсов Куйбышевского

водохранилища на р. Волге», в зимнюю межень и в начале весеннего половодья существенно увеличились площадь и объем водохранилища (табл. 4).

Таблица 4. Изменения площади (S) и объема (W) Куйбышевского водохранилища в зависимости от уровня воды (H) с декабря по апрель в различные периоды
Table 4. Changes in the area (S) and volume (W) of the Kuybyshev Reservoir depending on the water level (H) from December to April in different periods

Месяц	Период, год	H, м БС	S, км^2	ΔS		W, км^3	ΔW	
				км^2	%		км^3	%
Декабрь	1958–1979	50,62	5 090	–	–	43,788	–	–
	1980-2001	51,04	5 270	180	3,4	45,836	2,0	4,7
	2002-2024	51,26	5 406	136	2,6	47,455	1,6	3,5
Январь	1958–1979	49,83	4 728	–	–	39,838	–	–
	1980–2001	50,19	4 909	181	3,8	41,771	1,9	4,9
	2002–2024	50,94	5 225	316	6,4	45,302	3,5	8,5
Февраль	1958–1979	48,91	4 322	–	–	35,728	–	–
	1980–2001	49,35	4 547	225	5,2	37,989	2,3	6,3
	2002–2024	50,54	5 045	498	11,0	43,284	5,3	13,9
Март	1958–1979	48,03	3 930	–	–	32,022	–	–
	1980–2001	48,60	4 192	262	6,7	34,493	2,5	7,8
	2002–2024	50,43	4 999	807	19,3	42,780	8,3	24,0
Апрель	1958–1979	49,23	4 457	–	–	37,064	–	–
	1980-2001	49,47	4 593	136	3,1	38,451	1,4	3,8
	2002–2024	51,52	5 497	904	19,7	48,555	10,1	26,3

Примечание: Δ S, ΔW – разница площадей и объемов между периодами.

Площадь водохранилища в 2002–2024 гг. по сравнению с периодом 1958–1979 гг. увеличилась: в декабре на 6,0 %, с 5 090 до 5 406 км^2; в январе на 10,2 %, с 4 728 до 5 225 км^2; в феврале на 16,2 %, с 4 322 до 5 045 км^2; в марте на 26,0 %, с 3 930 до 4 999 км^2 и в апреле на 22,8 %, с 4 457 до 5 497 км^2 (табл. 4). Объем водохранилища в 2002–2024 гг. по сравнению с периодом 1958–1979 гг. увеличился: в декабре на 8,2 %, с 43,8 до 47,5 км^3; в январе на 13,4 %, с 39,8 до 45,3 км^3; в феврале на 20,2 %, с 35,7 до 43,3 км^3; в марте на 31,8 %, с 32,0 до 42,8 км^3 и в апреле на 30,1 %, с 37,1 до 48,6 км^3 (табл. 4).

Полученные результаты анализа динамики уровня воды и изменения морфометрических характеристик важны для исследования экологического состояния и формирования качества воды Куйбышевского водохранилища, используемого для водоснабжения, рыбного хозяйства и рекреации.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования установлено, что с 1958 по 2024 г. наметилась устойчивая тенденция повышения среднегодового уровня воды Куйбышевского водохранилища. За 67-летний период уровень воды повысился на 0,93 м в соответствии с положительным линейным трендом. Темп повышения среднегодового уровня воды составил 0,14 м/10 лет. Минимальные уровни повысились на 2,71 м при темпе 0,40 м/10 лет, а максимальные практически не менялись. Наиболее значительное повышение уровня воды наблюдалось в зимнюю межень и весеннее половодье: уровень воды в зимнюю межень повысился на 1,88 м при темпе 0,28 м/10 лет, а в весеннее половодье – на 1,30 м при темпе 0,20 м/10 лет.

Совместный анализ изменений уровня воды в Куйбышевском водохранилище и водности Волги за три периода показал, что между ними существует положительная линейная связь с коэффициентом корреляции 0,46–0,77. Однако тенденции изменения уровня и расхода воды не всегда совпадали: уровень воды в водохранилище от периода к периоду только повышался, а водность р. Волги от периода 1958–1979 гг. к периоду 1980–2001 гг. увеличивалась, а от 1980–2001 гг. к 2002–2024 гг., наоборот, уменьшалась. Следовательно, повышение среднего уровня воды Куйбышевского водохранилища невозможно объяснить воздействием только одного фактора – динамикой расхода воды р. Волги.

Неравномерность повышения уровня воды по гидрологическим сезонам позволяет сделать вывод, что еще одним основным фактором повышения среднегодового уровня воды водохранилища является смена режима сезонного регулирования водного стока р. Волги в замыкающем створе Куйбышевского водохранилища. Смена режима регулирования водного стока трансформировала сезонный ход уровня воды в водохранилище. Под воздействием двух факторов амплитуда сезонных колебаний уровня воды за период 1958–2024 гг. уменьшилась в 2 раза, с 4,6 м до 2,3 м, за счет значительного повышения уровня воды в зимнюю межень и весеннее половодье.

Таким образом, значительное повышение уровня воды Куйбышевского водохранилища в современный период (2002–2024 гг.) произошло за счет смены режима сезонного регулирования водного стока р. Волги в створе Жигулевского гидроузла. Смена режима регулирования водного стока обусловлена наметившийся тенденцией постепенного уменьшения водности Волги под воздействием глобальных климатических изменений.

В настоящее время в результате увеличения уровня воды изменились морфометрические показатели Куйбышевского водохранилища. В зимнюю межень и в начале весеннего половодья существенно увеличились площадь и объем водохранилища. По приближенным оценкам, в марте и апреле площадь водохранилища в 2002–2024 гг. по сравнению с периодом 1958–1979 гг. увеличились на 26,0 % и 22,8 %, а объем – на 31,8 % и на 30,1 % соответственно.

Установленные изменения уровенного режима и морфометрических характеристик Куйбышевского водохранилища представляют особый интерес для гидрологов, гидрохимиков и гидробиологов, занимающихся ис-

следованием формирования качества воды и оценкой состояния водных биологических ресурсов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища / под ред. В.А. Знаменского, В.М. Гейтенко. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 269 с.
2. Куйбышевское водохранилище / отв. ред. А.В. Монаков. Л.: Наука, 1983. 214 с.
3. Comprehensive assessment of the freshwater resource of the word / Scientific leader and editor prof. I.A. Shiklomanov. WMO. 1987. 88 p.
4. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / отв. ред. Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. М.: Наука, 2003. 367 с.
5. Водные ресурсы России и их использование / под. ред. И.А. Шикломанова. С-Пб: ГГИ, 2008. 600 с.
6. Makhmudovaa L., Mussinab A., Ospanovab M., Zharylkassynb A., Kanatulya A. Anthropogenic Impacts in the Yesil River Basin // Central Asian Journal of Water Research. 2023. No. 9 (2). P. 57–75. https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-2/57-75.eng.
7. Румянцев В.А., Коронкевич Н.И., Измайлова А.В., Георгиади А.Г., Зайцева И.С., Барабанова Е.А., Драбкова В.Г., Корнеенкова Н.Ю. Водные ресурсы рек и водоемов России и антропогенные воздействия на них // Известия РАН. Сер. географическая. 2021. Т. 85. № 1. С. 120–135.
8. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: 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., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. https://doi.org /10.1017/9781009157896.
9. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования / под ред. И.И. Мохова, А.А. Макоско, А.В. Чернокульского. М.: РАН. 2024. 360 с.
10. Kalugin A. Climate change effects on river flow in Eastern Europe: Arctic rivers vs. Southern rivers // Climate. 2023. Vol. 11 (5). No. 103. P. 1–15. https://doi.org/10.3390/cli11050103.
11. Ahn K-H., Merwade V. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow // Journal of Hydrology. 2014. P. 257–266. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.062.
12. Попова В.В., Бабина Е.Д., Георгиади А.Г. Климатические факторы изменчивости стока Волги во второй половине XX – начале XXI вв. // Известия РАН. Сер. География. 2019. № 4. С. 63–72.
13. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И., Киреева М.Б., Игонина М.И. Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод Европейской части России // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 571–589.
14. Geordiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin // Water Resources. 2021. Vol. 47, Iss. 6. P. 913–923. https://doi.org/10.1134/s0097807820060068.
15. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода, химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
16. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. 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. Iss. 3. P. 351–365. https://doi.org/10.1134/s0097807822030058.

17. Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милюкова И.П. О соотношении климатических и антропогенных факторов в изменении стока реки Волга // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 825–834. https://doi.org/10.31857/S2587556623060092.
18. Meshyk A., Makhmudova L., Zharylkassyn A., Kanatuly A., Zhulkainarova M. The contribution of climatic and anthropogenic factors to changes in the runoff of plain rivers // Vestnik of Brest State Technical University. 2022. No. 3 (129). P. 37–39. https://doi.org/10.36773/1818-1112-2022-129-3-37-39.
19. Селезнев В.А. Межгодовые изменения водности реки Волги в условиях глобальных климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 6. С. 6–21. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-6-6-21.
20. Беспалова К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Сезонная изменчивость концентрации хлоридных ионов в воде Куйбышевского водохранилища // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2022. Т. 40. С. 105–120. https://doi.org/10.31857/S258755662101012X.

REFERENCES

1. Hydro/meteorological regime of the USSR lakes and reservoirs: Kuybyshev and Saratov reservoirs. Edited by V.A. Znamensky, V.M. Geytenko. Leningrad: Gidrometeoizdat., 1978. 269 p. (In Russ.).
2. The Kuybyshev Reservoir. Edited by A.V. Monakov. Leningrad: Nauka., 1983. 214 p. (In Russ.).
3. Comprehensive assessment of the freshwater resource of the word. Scientific leader and editor Prof. I.A. Shiklomanov. WMO. 1987. 88 p.
4. Anthropogenic impact upon water resources of Russia and the neighboring countries in the late XX century. Edited by N. I. Koronkevich, and I.S. Zaytseva. Moskva: Nauka., 2003. 367 p. (In Russ.).
5. Water resources of Russia and their use. Edited by I.A. Shiklomanova. Saint-Petersburg: GGI Publ., 2008. 600 p. (In Russ.).
6. Makhmudovaa L., Mussinab A., Ospanovab M., Zharylkassynb A., Kanatulya A. Anthropogenic Impacts in the Yesil River Basin. *Central Asian Journal of Water Research.* 2023. No. 9 (2). P. 57–75. https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-2/57-75.eng.
7. Rumi͡antsev V.A., Koronkevich N.I., Izmaĭlova A.V., Georgiadi A.G., Zaĭt͡seva I.S., Barabanova E.A., Drabkova V.G., Korneyenkova N.I͡U. Water resources of the Russia rivers and water bodies and anthropogenic impact upon them. *Newsletters of RAS. Series: Geography.* 2021. Vol. 85. No. 1. P. 120–135. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S258755662101012X.
8. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: 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., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. https://doi.org /10.1017/9781009157896.
9. The climate change: causes, risks, consequences, adaptation and regulation issues. (Ed. by I.I. Mokhov, A.A. Makosko, A.V. Chernokulsky). Moskva : RAN Publ., 2024. 360 p. (In Russ.).
10. Kalugin A. Climate change effects on river flow in Eastern Europe: Arctic rivers vs. Southern rivers. *Climate*. 2023. Vol. 11 (5). No. 103 https://doi.org/10.3390/cli11050103
11. Ahn K- H., Merwade V. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow. *Journal of Hydrology*. 2014. P. 257–266 https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.062.
12. Popova V.V., Babina Y.D., Georgiadi A.G. Climatic factors of variability of the Volga runoff in the second half of the 20th – early 21st centuries. *Newsletters of RAS. Series: Geography*. No. 4. 2019. P. 63–72. (In Russ.).
13. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Krichevet͡s G.N., Safronova T.I., Kireeva M.B., Igonina M.I. Formation of current resources of surface water and groundwater of the European sector of Russia. *Water resources.* 2012. Vol. 39. № 6. P. 571–589.
14. Geordiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin. Water Resources, 2021. Vol. 47, issue 6. P. 913–923 https://doi.org/10.1134/s0097807820060068.

15. Alekseevskij N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Assessment of the climate change impact upon the Volga River basin rivers runoff. *Water, chemistry and ecology*. 2013. No. 4. P. 3–12. (In Russ.).
16. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. 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. Iss. 3. P. 351–365. https://doi.org/10.1134/s0097807822030058.
17. Koronkevih N.I., Georgiadi A.G., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. About relations between climate and anthropogenic factors in the Volga River runoff changes. *Newsletters of RAS. Series: Geography.* 2023. Vol. 87. No 6. P. 825–834 (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S2587556623060092.
18. Meshyk A., Makhmudova L., Zharylkassyn A., Kanatuly A., Zhulkainarova M. Contribution of climatic and anthropogenic factors to changes in the runoff of plain rivers. *Bulletin of Brest State Technical University.* 2022. No. 3 (129). P. 37–39. https://doi.org/10.36773/1818-1112-2022-129-3-37-39.
19. Seleznev V. A. Inter-year changes of the Volga River water content in the conditions of the global climate change. *Water Sector of Russia: Problems. Technologies, Management.* 2024. No. 6. P. 6–21. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-6-6-21.
20. Bespalova K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Seasonal variability of the chloride ions concentration in the Kuybyshev Reservoir water. *Bulletin of Irkutsk State University. Series: Sciences of the Earth.* 2022. Vol. 40. P. 105–120. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Селезнева Александра Васильевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория мониторинга водных объектов, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, 445003, Россия, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Комзина, 10; https://orcid.org/0000-0002-9386-999X; e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Селезнев Владимир Анатольевич, профессор, д-р техн. наук, канд. геогр. наук, главный научный сотрудник, лаборатория мониторинга водных объектов, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, 445003, Россия, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Комзина, 10; https://orcid.org/0000-0002-0321-7614; e-mail: seleznev53@mail.ru

About the authors:

Aleksandra V. Selezneva, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory for Monitoring Water Bodies, Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences - branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, ul. Komzina, 10, Togliatti, 445003, Samara Oblast, Russia; https://orcid.org/0000-0002-9386-999X; e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Vladimir A. Seleznev, Professor, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Geographical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory for Monitoring Water Bodies, Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, ul. Komzina, 10, Togliatti, 445003, Samara Oblast, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0321-7614; e-mail: seleznev53@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 24.05.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 30.05.2025.
Принята к публикации / Accepted 15.07.2025.

УДК: 556.53 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-44-60*

Изменение ресурсов речного стока под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов (на примере р. Чумыш)

Е.Ю. Седова, С.Ю. Самойлова

bastet@iwep.ru

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Барнаул, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В условиях глобальных климатических изменений особую значимость приобретает изучение динамики водного режима рек как одного из ключевых компонентов состояния водных ресурсов. Рациональное водопользование и адаптация водохозяйственных систем требуют понимания закономерностей изменения стока, обусловленного как природными, так и антропогенными факторами. Целью исследования является выявление особенностей многолетней динамики стока р. Чумыш в условиях изменяющегося климата и антропогенного воздействия с акцентом на внутригодовое перераспределение стока. **Методы.** Выполнен анализ метеорологических и гидрологических данных за период 1943–2021 гг.: проверена стационарность временных рядов, проведена оценка линейных трендов, построены разностно-интегральные кривые и рассчитаны коэффициенты естественной зарегулированности. Также проведены корреляционный и кросс-корреляционный анализы для выявления взаимосвязей между климатическими параметрами и стоком. **Результаты.** Установлено статистически значимое повышение температуры воздуха, особенно выраженное в холодный период, что сопровождается увеличением зимнего стока, снижением объемов весеннего половодья и максимальных расходов воды. Следствием этого является рост коэффициентов естественной зарегулированности. Антропогенное воздействие, включая регулирование стока и водозабор, оценивается как слабое и не оказывающее существенного влияния на водный режим р. Чумыш. Полученные данные подтверждают преобладающее влияние климатических факторов и могут быть использованы при разработке мер адаптации водного объекта к климатическим изменениям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: речной сток, климатические изменения, гидрологический режим, зимняя межень, половодье, естественная зарегулированность, водные ресурсы, р. Чумыш.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках базового госбюджетного проекта ИВЭП СО РАН № 0306-2021-0002.

Для цитирования: Седова Е.Ю., Самойлова С.Ю. Изменение ресурсов речного стока под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов (на примере р. Чумыш) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 44–60. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-44-60; EDN: GBQHFO

© Седова Е.Ю., Самойлова С.Ю., 2025

Changes in river flow resources under the influence of natural, climatic and anthropogenic factors
(the Chumysh River as a study case)

Evgeniya Y. Sedova, Svetlana Y. Samoylova
bastet@iwep.ru
IWEP SB RAS, Barnaul, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. Studies of the dynamics of water regime of rivers, as one of the key components of water resources, are of particular importance under global climate change. Rational water use and adaptation of water management systems call for understanding the patterns of runoff changes caused by both natural and anthropogenic factors. The aim of the study is to identify the features of the long-term dynamics of the Chumysh River runoff in the context of a changing climate and anthropogenic impacts, with an emphasis on its intra-annual redistribution. **Methods.** The paper deals with analyzing the meteorological and hydrological data (1943–2021) on checking the stationarity of time series, assessing linear trends, constructing difference-integral curves and calculating the coefficients of natural regulation. Correlation and cross-correlation analyses were also performed to establish relationships between climatic parameters and runoff. **Results.** We have revealed a statistically significant air temperature rise (especially pronounced in the cold period) accompanied by increased winter runoff, decreased volumes of spring floods, maximum water discharges that result in the increasing natural regulation. Anthropogenic impacts, including flow regulation and water intake, are assessed as weak; they make the insignificant effect on water regime of the Chumysh River. The obtained results confirm the predominant influence of climatic factors and can be used in developing the measures on adaption to climate change.

KEYWORDS: river runoff, climate change, hydrological regime, winter low water, flood, natural regulation, water resources, the Chumysh River.

Financing: The study was carried out within the framework of the state budget project (No. 0306-2021-0002) of the Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Sedova E.Y., Samoylova S.Y.Changes in river flow resources under the influence of natural, climatic and anthropogenic factors (the Chumysh River as a study case). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. No. 4. P. 44–60. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-44-60; EDN: GBQHFO

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время необходимость рационального использования природных ресурсов, включая водные, определена концепцией устойчивого развития[1]. В этом контексте Генеральная Ассамблея ООН объявила период 2018–2028 гг. международным десятилетием действий «Вода для устойчивого развития»[2], целью которого является активизация усилий государств, обще-

[1] Our Common Future. The World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, 1987. 383 p. [Электр. ресурс]: http://www.un documents.net/our-common-future.pdf. (дата обращения: 1.02.2025).

[2] Международное десятилетие действий «Вода для устойчивого развития», 2018–2028 годы. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН, 2016. 6 с. [Электр. ресурс]: https://digitallibrary.un.org/record/859143/files/A_RES_71_222-RU.pdf?ln=en. (дата обращения: 1.02.2025).

ственных организаций и научного сообщества в реализации мероприятий по обеспечению сбалансированного и справедливого водопользования.

Особое внимание уделяется необходимости комплексного управления водными ресурсами, учитывающего их неразрывную связь с социальными, экономическими и экологическими аспектами устойчивого развития. Одним из ключевых направлений выступает изучение количественных характеристик водных ресурсов, их объема, пространственно-временного распределения и устойчивости к внешним воздействиям [1, 2]. Для разработки эффективной стратегии устойчивого водопользования необходимо учитывать динамику количественных характеристик водных ресурсов, обусловленную как естественными климатическими изменениями, так и деятельностью человека [3].

В условиях природно-климатических и антропогенных изменений наблюдается трансформация динамики составляющих водного баланса, что отражается, в частности, на речном стоке [4, 5]. На территории России в последние годы отмечены значительные преобразования как годового стока, так и его внутригодового распределения [6, 7], включая случаи перехода водных объектов к иным типам водного режима [8], а также изменения максимального стока [9, 10]. Комплексный статистический анализ параметров сезонного стока – весеннего половодья, летне-осенней и зимней межени – позволяет выявить закономерности изменений водного режима реки и установить их связь с климатическими и антропогенными факторами [11].

Целью проведенного исследования является выявление изменений параметров стока р. Чумыш под воздействием природно-климатических и антропогенных факторов. В задачи работы входили анализ региональных особенностей и тенденций климатических сдвигов в бассейне р. Чумыш, исследование многолетней динамики годового стока и особенностей его внутригодового распределения в условиях изменяющегося климата и нарастающего антропогенного воздействия.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов для обоснования мер по устойчивому управлению водными ресурсами, прогнозированию гидрологических рисков и адаптации водохозяйственного комплекса региона к изменяющимся климатическим условиям.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом настоящего исследования является р. Чумыш и ее водосборный бассейн, расположенные в пределах Обь-Иртышского речного бассейна. Длина реки составляет 644 км, площадь водосбора – 23 400 км². Согласно классификации водотоков по ГОСТ 19179-73[3], р. Чумыш относится к категории средних рек (с площадью бассейна от 2 000 до 50 000 км²). Территория бассейна находится в пределах Алтайского края, Кемеровской и Новосибирской областей (рис. 1).

[3] ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения.

По данным АИС ГМВО[4], в бассейне р. Чумыш водопотребление ежегодно составляет от 40 до 60 млн м^3 забранных вод, при этом в отдельные годы оно может достигать 80–90 млн м^3. Коэффициент изъятия водных ресурсов колеблется от 1,5 % в годы средней водности до 2,1–2,3 % в годы с минимальным водообеспечением (при 95%-ной обеспеченности), а также в трехлетние минимальные периоды, с учетом безвозвратного водопотребления, что соответствует низкому уровню водного стресса [12].

Во временном разрезе наибольший объем забора воды в пределах бассейна р. Чумыш наблюдался в 2017 г. и составил 55 млн м^3, что на 4 % превышает уровень водопотребления 2021 г. Наибольшими водопотребителями в 2021 г. являлись Прокопьевский муниципальный округ (33,6 млн м^3) и Новокузнецкий район (6,0 млн м^3) Кемеровской обл., а также Заринский (8,9 млн м^3) район Алтайского края.

Средний многолетний расход воды составляет 130,2 м^3/с, максимальный расход – 2 570 м^3/с, минимальный – 11,3 м^3/с.

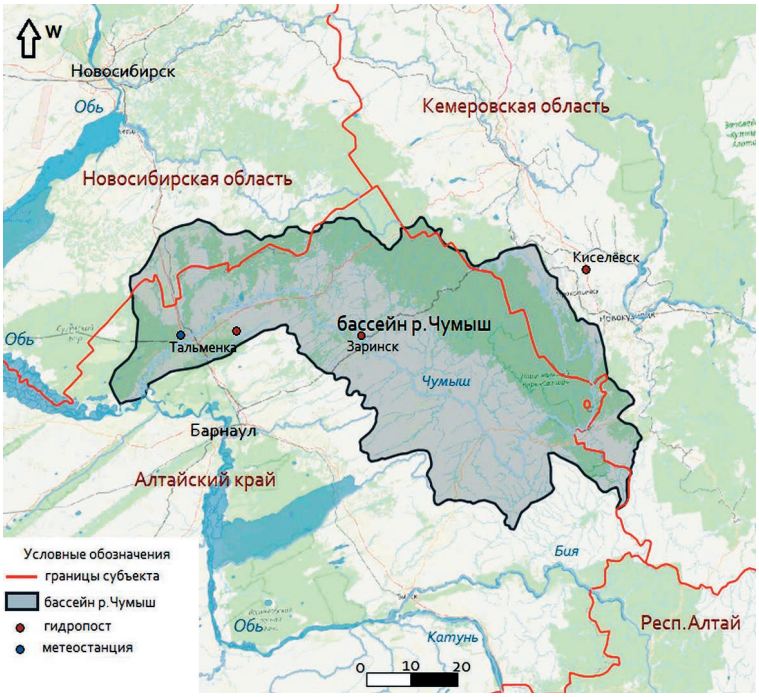


Рис. 1. Картосхема бассейна р. Чумыш.
Fig. 1. Schematic map of the Chumysh River basin.

Формирование стока р. Чумыш определяется физико-географической неоднородностью региона. Чумыш образуется в результате слияния рек Кара-Чумыш и Томь-Чумыш на восточном склоне Салаирского кряжа. Бассейн расположен в пределах юго-западной части Салаирского кряжа, Предсалаирской равнины и Бийско-Чумышской возвышенности.

[4] Электронный ресурс: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 1.04.2025).

Абсолютные высоты бассейна не превышают 600 м. Климат умеренно континентальный. По данным метеостанции Тальменка, среднегодовая температура составляет 1,26 °С; наиболее холодный месяц – январь (–17 °С), самый теплый – июль (18–19 °С). Среднегодовое количество осадков – в пределах 530 мм [13].

Для расчета характеристик стока р. Чумыш использованы данные о расходах воды с месячным и суточным разрешением по гидрологическому посту, расположенному в рп Тальменка в 74 км от устья. Площадь водосбора до гидропоста составляет 20 600 км^2. Наблюдения на посту ведутся с 1943 г. Выбор данного поста обусловлен наличием длительного временного ряда (более 50 лет), что обеспечивает высокую достоверность результатов[5].

Разделение на гидрологические сезоны проводилось по средним датам их наступления: половодье (апрель – июнь), летне-осенняя межень (июль – октябрь), зимняя межень (ноябрь – март). Источниками информации послужили гидрологические ежегодники и фонд АИС ГМВО[6]. Полученные данные обрабатывали с использованием программ Statistica, Excel.

Для анализа региональных тенденций изменения климата в качестве исходных данных приняты многолетние ряды по метеостанциям в рп Тальменка, г. Заринске Алтайского края и г. Киселёвске Кемеровской области за 66 лет (1955–2021 гг.). Источник метеоданных – ВНИГМИ-МЦД[7].

Для выявления тенденций изменения климатических показателей (температуры воздуха и количества осадков) применялись линейные тренды. Оценка значимости линейных трендов выполнена в соответствии с Методическими рекомендациями по оценке однородности гидрологических характеристик[8]. Оценивался коэффициент корреляции R по отношению к его случайной средней квадратической ошибке σ_R, т. е. ($R/\sigma_R > \beta$), при 5%-ном уровне значимости или при 95%-ной доверительной границе $\beta = 2$ (табл. 1).

Проверка стационарности временных рядов осуществлялась по трем тестам: SNHT, Buishand и Pettitt в соответствии с [14, 15]. Нулевая гипотеза предполагает однородность ряда в заданном временном интервале.

Для оценки цикличности речного стока применялись разностно-интегральные кривые (РИК), рассчитываемые по формуле:

$$S_t = \frac{\sum(K_{Qi} - 1)}{C_v}, \quad (1)$$

где модульный коэффициент K_{Qi} равен отношению $Q_i/\overline{Q}$, в котором $\overline{Q}$ – среднее арифметическое значений всего ряда;

S_t – кривая накопления стока в косоугольных координатах с масштабом $Q_0 = 1$;

C_v – коэффициент вариации.

[5] СП 529.1325800.2023. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

[6] Электронный ресурс: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 1.04.2025).

[7] Электронный ресурс: http://meteo.ru (дата обращения: 1.04.2025).

[8] Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по однородным показателям. СПб.: Нестер-История, 2010. 162 с.

Таблица 1. Оценка значимости линейных трендов температуры воздуха в бассейне р. Чумыш (м/с Тальменка), изменение температуры воздуха в холодный и теплый периоды в бассейне р. Чумыш за 1943–2021 гг.
Table 1. Assessment of the significance of linear trends in air temperature in the Chumysh River basin (m/s Talmenka), changes in air temperature in the cold and warm periods in the Chumysh River basin for the period 1943–2021

Метеостанция	Уравнение	R_2	r	σ_r	$2\sigma_r$	Теплый период, °С / 10 лет	Холодный период, °С / 10 лет
Тальменка	y = 0,0336x – 65,564	0,27	0,52	0,083	0,166	0,27	0,5
Заринск	y = 0,0347x – 67,252	0,29	0,54	0,081	0,162	0,25	0,41
Киселёвск	y = 0,0304x – 58,325	0,26	0,51	0,084	0,168	0,24	0,4

Важнейшим показателем внутригодовой изменчивости стока является его естественная зарегулированность, для оценки которой использован коэффициент естественной зарегулированности ф. Он соответствует доле «базисного» в годовом объеме стока и рассчитывается как отношение площади гидрографа, расположенной ниже ординаты среднегодового расхода (F_1), к общей площади гидрографа (F_2) [16]:

$$ф = F_1 / F_2. \quad (2)$$

Среди основных антропогенных преобразований, влияющих на сток р. Чумыш, выделяется строительство и эксплуатация Кара-Чумышского водохранилища (1953 г.) объемом 62,75 млн м^3, предназначенного для водоснабжения Прокопьевска и Киселёвска. Создание Кара-Чумышского водохранилища могло оказать влияние на сезонное перераспределение стока, в частности – на уменьшение амплитуды весеннего половодья и увеличение водности в летне-осенний период.

Для оценки доли зарегулированности речного стока использовался индекс гидрологической зарегулированности [17]:

$$ИГЗ = (V_{общ} / V_{рег}) \times 100, \quad (3)$$

где ИГЗ – индекс гидрологической зарегулированности;

$V_{рег}$ – объем воды, который регулируется за счет водохранилищ и других гидротехнических сооружений;

$V_{общ}$ – общий объем стока реки.

Для оценки зависимостей тенденций речного стока от климатических параметров применен коэффициент корреляции Спирмена (r_s) по формуле:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)}, \quad (4)$$

где d_i – разность между рангами соответствующих значений двух переменных;

n – число наблюдений.

Дополнительно проведенный кросс-корреляционный анализ позволил оценить запаздывающий эффект влияния климатических факторов на гидрологический режим.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На водный режим р. Чумыш оказывают влияние как природные, так и антропогенные факторы. К числу природных в первую очередь относятся климатические – температура приземного воздуха и количество выпавших атмосферных осадков. Среди антропогенных факторов выделяются водозабор из поверхностных источников и регулирование стока, осуществляемое за счет функционирования Кара-Чумышского водохранилища, расположенного в истоках реки.

Температура воздуха является ключевым климатическим параметром, влияющим на гидрологические процессы. Ее изменения воздействуют на влагообмен и процессы стока в речных бассейнах [18]. Анализ линейных трендов показал статистически значимое повышение среднегодовой температуры воздуха на метеостанциях Тальменка, Заринск и Киселёвск. Средняя величина потепления за период наблюдений составила 0,34 °С/10 лет, что согласуется с общероссийскими тенденциями потепления [5] (рис. 2).

Максимальный прирост температур отмечен в холодный сезон (ноябрь – март). Так, в 2002 г. в Киселёвске отклонение от нормы достигло +7,4 °С, в Тальменке и Заринске – +5,5 °С и +5,0 °С соответственно.

В отличие от температуры, многолетняя динамика атмосферных осадков не демонстрирует устойчивых и статистически значимых трендов на всей территории бассейна.

Атмосферные осадки являются основной приходной составляющей водного баланса, поэтому существенные колебания их количества рассматриваются как ключевой фактор, определяющий формирование многоводных или маловодных лет [19]. Отмечается чередование лет с положительными и отрицательными аномалиями, при этом периоды преобладания определенного типа увлажнения длятся в среднем 3–5 лет (табл. 2).

Влияние указанных факторов подтверждается результатами статистического анализа среднегодовых расходов воды р. Чумыш в створе рп Тальменка за периоды 1943–1973 и 1974–2021 гг. Выбор интервала сравниваемых периодов обусловлен неоднородностью временного ряда данных («переломный» год – 1973). Нарушение однородности ряда может быть связано как с климатическими факторами (ростом температуры воздуха), так и с переносом гидрологического поста на 310 м выше по течению. Перемещение поста, очевидно, не оказывает значимого влияния на величину стока, однако возможное изменение русловых характеристик может влиять на точность измерений [14]. Все методы показали схожие результаты, подтвердив неоднородность ряда при 5%-ном уровне значимости.

Результаты тестов Pettitt's test, SNHT и Buishand's test выявили нарушение однородности ряда в зимний и весенний периоды (1973 г. и 1979 г. соответственно), тогда как ряды летне-осенней межени остались статистически однородными (табл. 3).

Сравнение средних значений базового (1943–1973 гг.) и современного периода (1974–2021 гг.) показало снижение годового стока с 4,7 до 3,8 км^3 (–19 %), что контрастирует с общими тенденциями увеличения водности в Верхнеобском бассейне (табл. 4) [20, 14].

Таблица 2. Значения положительных и отрицательных аномалий годового количества атмосферных осадков за период с 1973 по 2021 г.
Table 2. Values of positive and negative anomalies of annual precipitation for the period from 1973 to 2021

Год	Тальменка	Заринск	Год	Тальменка	Заринск	Год	Тальменка	Заринск	Год	Тальменка	Заринск
1973	-81,3	-73,5	1985	104,7	-97,5	1997	-	-	2009	-	-9,5
1974	-73,3	-117,5	1986	-16,3	-80,5	1998	-	-	2010	-63,3	25,5
1975	13,7	-71,5	1987	-15,3	18,5	1999	-	-	2011	-172,3	-37,5
1976	-22,3	30,5	1988	-165,3	-130,5	2000	185,7	320,5	2012	-62,3	147,5
1977	-85,3	-149,5	1989	-57,3	24,5	2001	89,7	205,5	2013	-29,3	170,5
1978	-33,3	-79,5	1990	21,7	304,5	2002	109,7	302,5	2014	176,7	73,5
1979	11,7	-62,5	1991	-50,3	293,5	2003	-111,3	47,5	2015	309,7	233,5
1980	-45,3	-171,5	1992	98,7	-42,5	2004	-46,3	108,5	2016	116,7	132,5
1981	-135,3	-55,5	1993	-45,3	-27,5	2005	-	-	2017	67,7	146,5
1982	-4,3	-196	1994	30,7	-82,5	2006	-	-	2018	14,7	100,5
1983	62,7	-182,5	1995	11,7	-	2007	-	-	2019	-85,3	15,5
1984	91,7	-109,8	1996	65,7	-	2008	-	-	2020	-79,3	72,5
									2021	-17,3	20,5

Примечание: цветом выделены значения положительных аномалий.

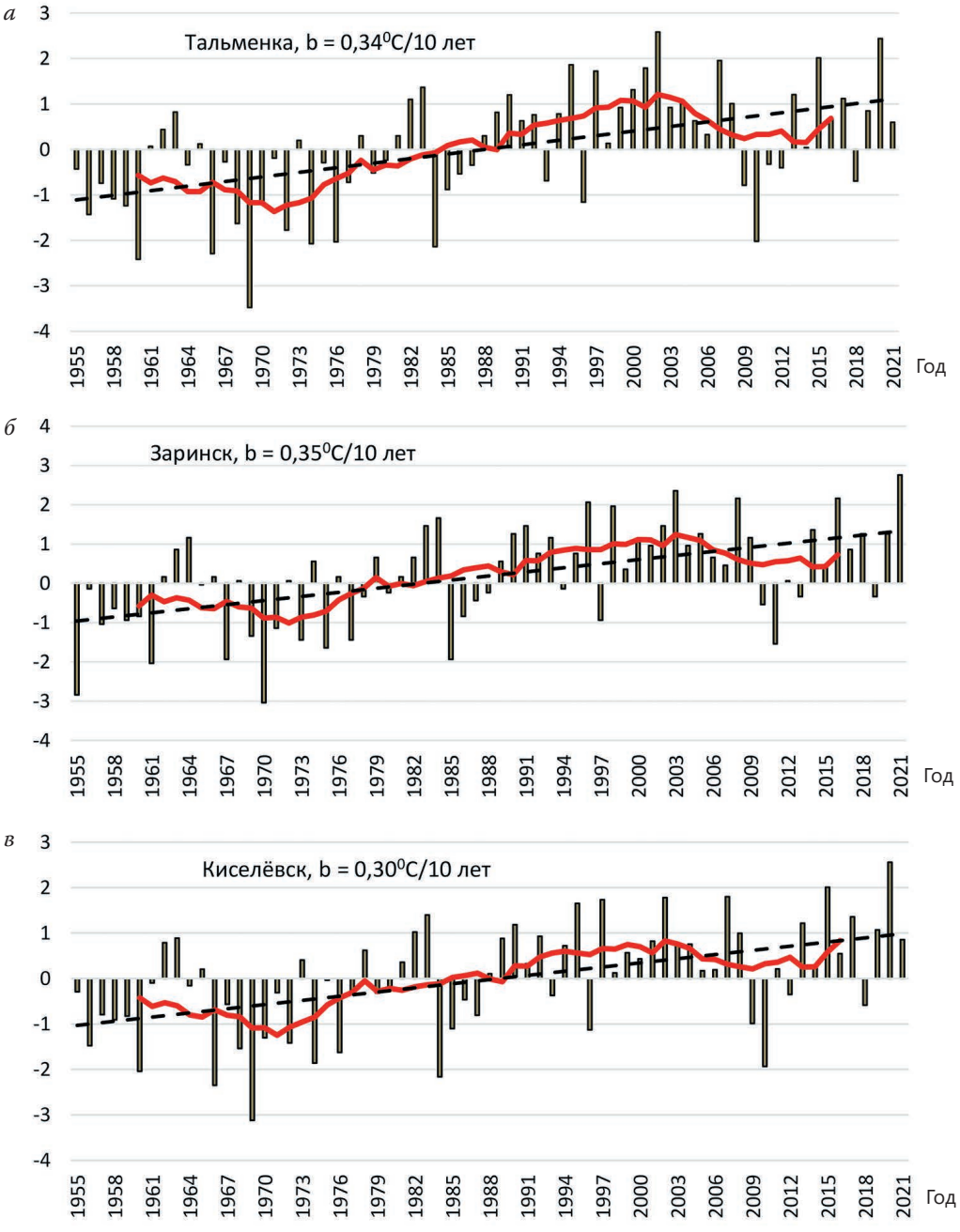


Рис. 2. Среднегодовые аномалии приземной температуры воздуха (°С) за период 1955–2021 гг., график 11-летних скользящих значений, линейный тренд (пунктирная линия), b – коэффициент тренда (°С/10 лет) по данным: м/с Тальменка (*а*), Заринск (*б*), Киселёвск (*в*).

Fig. 2. Average annual temperature anomalies of surface air temperature (°C) for the 1955–2021 period, graph of 11-year moving averages, b – trend coefficient (°C/10 years) according to Talmenka (*a*), Zarinsk (*b*), Kiselevsk (*c*) data.

Таблица 3. Результаты анализа на однородность расходов воды в зимнюю, летне-осеннюю межень и половодье (р. Чумыш – рп Тальменка)
Table 3. Results of the analysis on the uniformity of expenditures in winter, summer and autumn low water and high water periods (the Chumysh River – Talmenka)

Фаза	Метод		
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test
Год	1973	1973	1973
Зимняя межень	2001	2013	2006
Летне-осенняя межень	однородный	однородный	однородный
Половодье	1979	1979	1979

Таблица 4. Изменение годового стока р. Чумыш
Table 4. Change in annual flow of the Chumysh River

Река – створ	Периоды	Среднее значение, Q км^3/год	Дисперсия, σ^2	C_s	C_v
Чумыш – Тальменка	1943–1973	4,7	1,1	0,05	1,6
	1974–2021	3,8	0,6	0,05	1,3
	%	–19	–46	0	–19

Климатически обусловленные изменения годового стока р. Чумыш проявляются синхронными колебаниям атмосферных осадков фазами низкой и высокой водности. На основе анализа РИК (K_{Qi}) выделены четыре фазы водности: до 1946 г. – снижение водности (K_{Qi} = 0,94); 1947–1966 гг. – рост (K_{Qi} = 1,2); 1967–2012 гг. – понижение (K_{Qi} = 0,89); с 2012 г. по настоящее время – вновь рост (K_{Qi} = 1,06) (рис. 3).

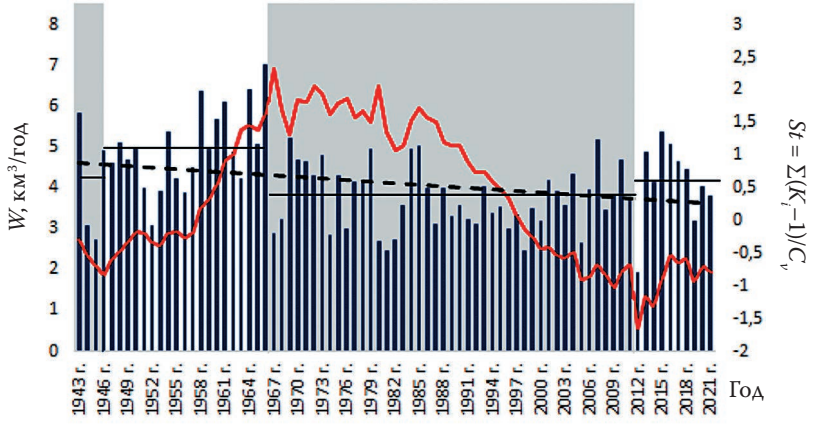


Рис. 3. Многолетняя динамика изменений объема годового стока р. Чумыш (гистограмма), разностно-интегральная кривая (график), среднее значение объема годового стока по периодам (горизонтальная линия), линейный тренд (пунктирная линия).
Fig. 3. Long-term dynamics of annual runoff volume changes (histogram), difference-integral curve (graph), average annual runoff volume by period (horizontal line), linear trend (dotted line).

Установленная тенденция роста температуры воздуха, особенно в холодный период, приводит к внутригодовому перераспределению стока, выражающемуся в увеличении стока зимней межени с 1,2 до 1,8 км^3/год (рост в среднем на 33 %). Повышение температуры воздуха в зимний период уменьшает глубину промерзания почвы и увеличивает количество оттепелей. Следствием этих изменений является рост грунтового питания и зимнего меженного стока. Реакция на климатические изменения, проявляющаяся в виде роста зимнего меженного стока, характерна для рек умеренного пояса [6, 21].

Не менее показательно влияние климатических изменений на половодье, важным фактором формирования которого является температура воздуха. Из-за смещения снеготаяния на более ранние даты среднее время начала половодья сдвинулось на 8 суток – с 8 апреля в середине XX в. на 31 марта в последние годы. При этом средний срок окончания половодья остался неизменным – 8 июня.

Сокращение продолжительности зимы, рост зимних температур и количества оттепелей ведут к уменьшению количества зимних осадков, участвующих в формировании весеннего стока. Уменьшение глубины промерзания почвы увеличивает ее инфильтрационную способность и уменьшает коэффициент стока весеннего половодья. Как следствие, на р. Чумыш наблюдается статистически значимое снижение объема половодья с 10,3 до 7,8 км^3/год (на 24 %) (рис. 4).

Еще более показательно снижение максимального стока. Максимальные расходы половодья снизились более чем на 30 %, тренд значим на 1%-ном уровне (рис. 5.) Схожие закономерности установлены на ряде рек бассейна Волги [3]. Следует отметить, что изменение стока половодья на реках Верхнеобского бассейна имеет разнонаправленные тенденции: на реках Алтайской горной области наблюдается рост расходов половодья, в ряде случаев – статистически значимый. Очевидно, что сток р. Чумыш, бассейн которой расположен преимущественно на равнине, более чувствителен к изменению инфильтрационной способности почв, в отличие от горных водосборов, на которых коэффициенты талого стока относительно постоянны.

Рост зимнего меженного периода и снижение стока половодья свидетельствуют о росте естественной зарегулированности стока. Подтверждение этой тенденции получено при анализе разностно-интегральной кривой коэффициента естественной зарегулированности (ф), который позволил выделить точку перелома – 1979 г. (рис. 6). Данный год подтвержден тестом SNHT, с помощью которого выявлено нарушение однородности временного ряда. Если в первом периоде среднее значение коэффициента ф составляло 0,46, то во втором – 0,54 (рис. 7).

Следует отметить, что значительное увеличение естественной зарегулированности стока по масштабу может быть сопоставимо с влиянием водохранилищ сезонного регулирования [22], что и наблюдается на р. Чумыш.

Результаты анализа коэффициента Спирмена выявили значимую положительную корреляцию годового стока с осадками (r_s = 0,78) и температурой воздуха (r_s = 0,63), что указывает на значительное влияние атмосферного увлажнения и температуры воздуха на формирование водного режима.

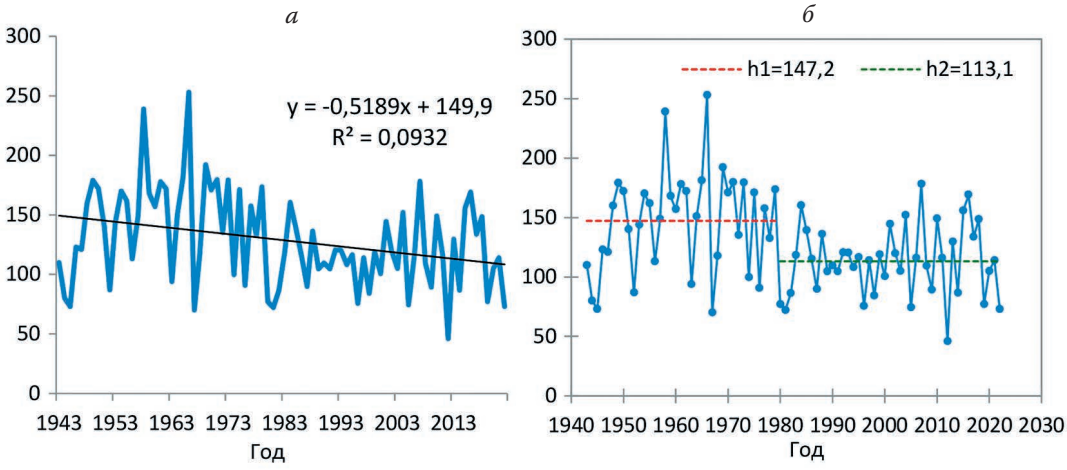


Рис. 4. Изменение слоя стока (h) половодья р. Чумыш за период 1943–2022 гг.: линейный тренд (*а*); результат SNHT (*б*) (Pettitt и Buishand – результаты аналогичные).
Fig. 4. Change in the runoff depth (h) of the Chumysh River flood for the 1943–2022 period: linear trend (*a*); SNHT result (*b*) (Pettitt and Buishand gave similar results).

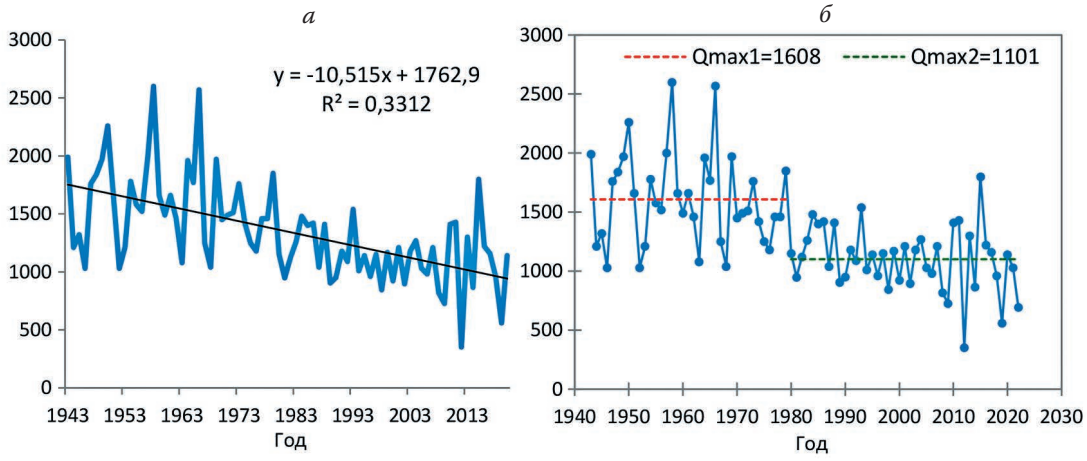


Рис. 5. Изменение максимальных расходов (Q_{max}) р. Чумыш за период 1943–2022 гг.: линейный тренд (*а*); результат теста SNHT (*б*) (Pettitt и Buishand – результаты аналогичные).
Fig. 5. Change in maximum discharges (Q_{max}) of the Chumysh River for the 1943-2022 period: linear trend (*a*); SNHT test result (*b*) (Pettitt and Buishand gave similar results).

Кросс-корреляционный анализ показал запаздывающее влияние осадков на сток с максимальным эффектом при лаге в один год (r = 0,35). Влияние температурного режима на сток проявляется через три года, коэффициент корреляции составляет –0,32.

Несмотря на наличие отдельных гидротехнических сооружений в бассейне р. Чумыш, включая Кара-Чумышское водохранилище, антропогенное воздействие на водный режим остается незначительным. Доля зарегулированности

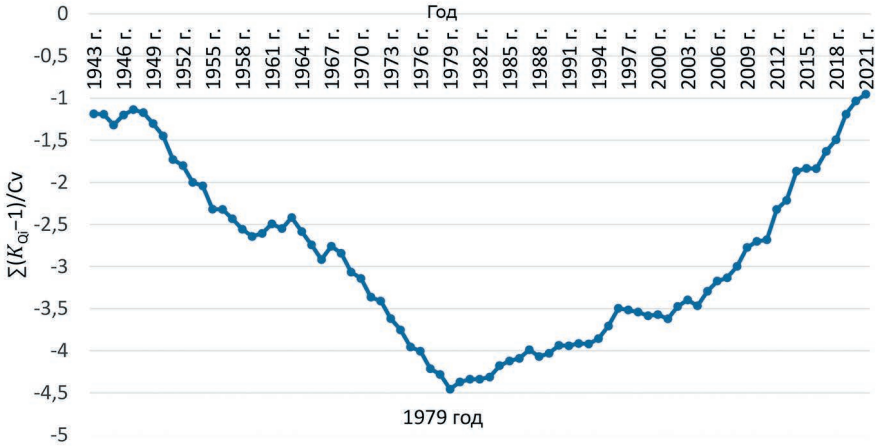


Рис. 6. Разностные интегральные кривые коэффициента естественной зарегулированности стока р. Чумыш (г/п Тальменка).
Fig. 6. Differential integral curves of the coefficient of natural flow regulation ϕ of the Chumysh River (Talmenka).

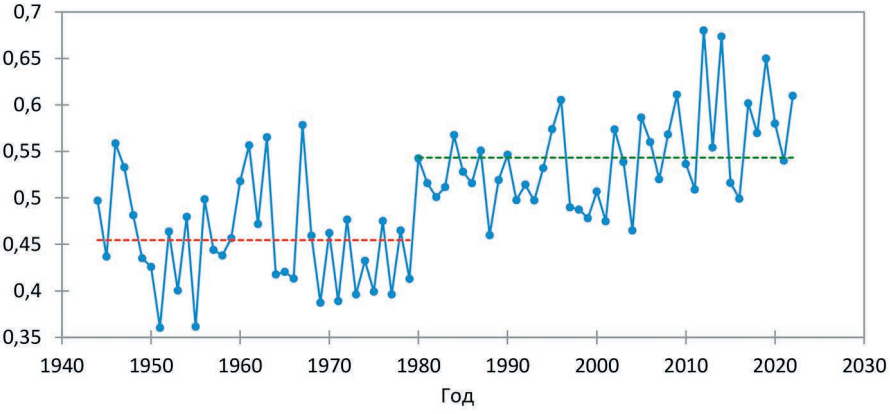


Рис. 7. Определение даты нарушения однородности рядов коэффициента естественной зарегулированности стока р. Чумыш по SNHT (Pettitt и Buishand – результаты аналогичные).
Fig. 7. Determination of the date of violation of the uniformity of the series of the coefficient of natural flow regulation ϕ of the Chumysh River (Pettitt and Buishand gave similar results).

р. Чумыш составляет лишь 2 % при годовом объеме стока 4,09 км^3, однако для р. Кара-Чумыш этот показатель достигает 42 % при годовом объеме речного стока 0,149 км^3. Слабое влияние водохранилища на годовой сток р. Чумыш подтверждает и отсутствие нарушения стационарности рядов за период до 1973 г. (включая годы строительства водохранилища).

По данным государственной статистики[9], в 2021 г. объем изъятия водных ресурсов составил менее 1 % (34 млн м^3) годового стока р. Чумыш и 6 % годового стока р. Кара-Чумыш (18 млн м^3).

[9] Электронный ресурс: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 1.04.2025).

Таким образом, антропогенное влияние на сток р. Чумыш носит локализованный характер и по степени воздействия на составляющие водного баланса существенно уступает климатическим факторам.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ метеорологических и гидрологических данных в бассейне р. Чумыш позволил выявить устойчивое и статистически значимое потепление, особенно выраженное в холодный период года.

На фоне климатических флуктуаций выявлено внутригодовое перераспределение стока: доля весеннего половодья снижается (в среднем на 24 %), тогда как сток зимней межени возрастает (в среднем на 33 %). «Переломным» является 1979 г., что подтверждается результатами тестов на нарушение стационарности временных рядов. Из-за выраженного снижения объема половодья наблюдается статистически значимое уменьшение годового и максимального стоков. Последнее весьма благоприятно с точки зрения снижения рисков опасных гидрологических явлений.

В ходе проведения исследования установлено минимальное влияние антропогенного воздействия на водный режим р. Чумыш. Доля зарегулированности составляет не более 2 %, а объемы водозабора не превышают 1 % годового стока, что не оказывает статистически значимого воздействия на его динамику. В отличие от главной реки, в бассейне притока – р. Кара-Чумыш – наблюдается более выраженное антропогенное влияние, индекс зарегулированности которого достигает 42 %. В то же время климатически обусловленный рост коэффициента естественной зарегулированности стока р. Чумыш сопоставим с влиянием строительства водохранилища.

Полученные результаты подтверждают ведущую роль климатических факторов в изменении водного режима бассейна и могут быть использованы при разработке адаптационных мер в условиях продолжающихся климатических трансформаций.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова Н.Е., Иванютин Н.М., Тарасенко В.С., Паштецкий В.С., Подовалова С.В. Рациональное водопользование в Республике Крым: значение, ограничения, подходы к достижению // Водные ресурсы. 2022. Т. 29. № 4. С. 372–381. DOI: 10.31857/S0321059622040198.
2. Данилов-Данильян В.И., Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Экология и климат: где мы сейчас и где будем через два-три десятилетия. Общемировые тенденции // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 930–941. DOI: 10.31857/S0869587323110038.
3. Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата // Докл. VII Всеросс. гидролог. съезда. 2013. С. 1–5.
4. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 676 с.

5. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022. 3056 p.
6. Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 206–218. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-2-2.
7. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-42-60.
8. Гельфан А.Н., Гусев Е.М., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю.Г., Насонова О.Н., Миллионщикова Т.Д., Фролова Н.Л. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в XXI веке // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 270–285. DOI: 10.31857/S0321059622030051.
9. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
10. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 46–55.
11. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
12. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты. М.: Наука, 2006.
13. Самойлова С.Ю., Ловцкая О.В., Кудишин А.В., Арнаут Д.В. Анализ факторов формирования максимального стока реки Чумыш (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 5. С. 116–128. DOI: 10.18799/24131830/2023/5/3983.
14. Самойлова С.Ю., Ловцкая ОВ., Голубева АБ. Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 21–38. DOI: 10.35567/1999-4508-2024-5-21-38.
15. Wijngaard J.B, Klein Tank A.M.G, Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series // International Science Journal of Climatology. 2003. 23 (6). P. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
16. Фролова Н.Л., Нестеренко Д.П., Шенберг Н.В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 8–16.
17. Широков В.М., Гриневич А.Г. Зарегулированность стока рек Полесья // Вестник Белорусского государственного университета имени В.И. Ленина. Сер. 2. Химия. Биология. География. 1982. № 2. С. 55–58.
18. Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Особенности реакции рек русской равнины на изменение температуры воздуха // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2012. № 6. С. 55–62. DOI: 10.15356/0373-2444-2012-6-55-62.
19. Черенкова Е.А., Сидорова М.В. Оценка современных условий недостаточного увлажнения, влияющих на маловодность в бассейнах крупных рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 260–269. DOI: 10.31857/S0321059621030068.
20. Зиновьев А.Т., Кошелева Е.Д. Произошедшее и ожидаемое изменение объема стока рек Обь-Иртышского бассейна под влиянием природно-климатических факторов // Вопросы географии. Сб. 145. Гидрологические изменения. М.: Издательский дом «Кодекс». 2018. С. 77–88.
21. Коробкина Е.А., Филиппова И.А., Харламов М.А. Оценка стока в бассейне р. Дон: необходимость смены парадигмы гидрологических расчетов // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 663–673. DOI: 10.31857/S0321059620060073.
22. 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. DOI: 10.35567/1999-4508-2013-6-32-49.

REFERENCES

1. Volkova N.E., Ivanyutin N.M., Tarasenko V.S., Pashtetsky V.S., Podovalova S.V. Rational water use in the Republic of Crimea: significance, limitations, approaches to achievement. *Water Resources.* 2022. Vol. 29. No. 4. P. 372–381. DOI: 10.31857/S0321059622040198. (In Russ.).
2. Danilov-Danilyan V.I., Kattsov V.M., Porfiriev B.N. Ecology and climate: where we are now and where we will be in two-three decades. Global trends. *Bulletin of Russian Academy of Sciences.* 2023. Vol. 93/ No. 10. P. 930–941. DOI: 10.31857/S0869587323110038. (In Russ.).
3. Georgievsky V.Yu., Koronkevich N.I., Alekseevsky N.I. Water resources and hydrological regime of rivers of the Russian Federation in the conditions of climate change. *Report at VII Hydrological Congress*. 2013. P. 1–5. (In Russ.).
4. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation / ed. by V.M. Kattsov; Roshydromet. Saint Petersburg: Naukoyomkie tecknologii [Science-intensive technologies], 2022. 676 p. (In Russ.).
5. IPCC, 2022: Climate Change, 2022: Impacts, adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, New York, USA, 2022. 3056 p.
6. Bolgov M.V., Filippova I.A., Osipova N.V., Korobkina E.A., Trubeckova M.D. Current features of the Volga River basin rivers hydrological regime. *Issues of Geography.* 2018. No. 145. P. 206–218. (In Russ.).
7. Lavrov S.A., Kalyuzhny I.L. The influence of climatic changes on the runoff of the spring flood and the factors of its formation in the Volga basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2016. No. 6. P. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-42-60. (In Russ.).
8. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. River flow in Russia under current and projected climate changes: a review of publications. 2. The impact of climate change on the water regime of Russian rivers in the 21st century. *Water Resources.* 2022. Vol. 49. No. 3. P. 270–285. DOI: 10.31857/S0321059622030051. (In Russ.).
9. Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. The influence of climate change on the annual and maximum runoff of Russian rivers: assessment and forecast. *Fundamental and Applied Climatology.* 2021. Vol. 7. No. 1. P. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79. (In Russ.).
10. Georgievsky V.Yu., Grek E.A., Grek E.N., Lobanova A.G., Molchanova T.G. Assessment of modern changes in the maximum flow of Russian rivers. *Meteorology and hydrology.* 2019. No. 11. P. 46–55. (In Russ.).
11. Water resources of Russia and their use / Edited by I.A. Shiklomanova. Saint Petersburg: GGI, 2008. 600 p. (In Russ.).
12. Danilov-Danil'yan V.I., Losev K.S. Water consumption: ecological, economic, social and political aspects. M: Nauka, 2006. (In Russ.).
13. Samoilova S.Yu., Lovtskaya O.V., Kudishin A.V., Arnaut D.V. Analysis of factors of formation of the maximum flow of the Chumysh River (Western Siberia). *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Geo/resource engineering.* 2023. Vol. 334. No. 5. pp. 116–128. DOI 10.18799/24131830/2023/5/3983. (In Russ.).
14. Samoilova S.Yu., Lovtskaya O.V., Golubeva A.B. Assessment of the stationarity of annual and seasonal river flow in the Upper Ob basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 5. P. 21–38. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-21-38. (In Russ.).
15. Wijngaard J.B, Klein Tank A.M.G, Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Science Journal of Climatology*. 2003. 23 (6). P. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
16. Frolova N.L., Nesterenko D.P., Schoenberg N.V. Intra-annual distribution of Russian river flow. *Bulletin of the Moscow University.* Series 5. Geography. 2010. No. 6. P. 8–16. (In Russ.).
17. Shirokov V.M., Grinevich A.G. Overregulation of Polesie river flow. *Bulletin of V.I. Lenin Belarusian State University.* Ser. 2. Chemistry. Biology. Geography. 1982. No. 2. P. 55–58. (In Russ.).
18. Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Special features of the Russian plain rivers' reaction to air temperature changes. *Bulletin of Russian Academy of Science. Series Geography.* 2012. No. 6. P. 55–62. DOI: 10.15356/0373-2444-2012-6-55-62. (In Russ.).

19. Cherenkova E.A., Sidorova M.V. Assessment of modern conditions of insufficient moisture affecting lack of water in the basins of large rivers of the European part of Russia. *Water Resources.* 2021. Vol. 48. No. 3. P. 260–269. DOI: 10.31857/S0321059621030068. (In Russ.).
20. Zinoviev A.T., Kosheleva E.D. The occurred and expected change in the volume of river flow in the Ob-Irtysh basin under the influence of natural and climatic factors. *Issues of Geography.* Collection 145. Hydrological changes. Moscow: Codex Publishing House. 2018. P. 77–88. (In Russ.).
21. Korobkina E.A., Filippova I.A., Kharlamov M.A. Assessment of runoff in the Don River basin: the need to change the paradigm of hydrological calculations. *Water Resources.* 2020. Vol. 47. No. 6. P. 663–673. DOI: 10.31857/S0321059620060073. (In Russ.).
22. Frolova N.L., Agafonova S.A., Nesterenko D.P., Povalishnikova E.L. Natural overregulation of river flow in the Volga basin in a changing climate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2013. No. 6. P. 32–49. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Седова Евгения Юрьевна, младший научный сотрудник, лаборатория водных ресурсов и водопользования, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0003-0566-9267, e-mail: zhenya_sedova@mail.ru

Самойлова Светлана Юрьевна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, лаборатория гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-3365-0048; e-mail: bastet@iwep.ru

About the authors:

Evgeniya Y. Sedova, Junior Researcher at the Laboratory of Water Resources and Water Management of IWEP SB RAS, ul. Molodezhnaya, 1, Barnaul, 656038, Russia; ORCID: 0000-0003-0566-9267, e-mail: zhenya_sedova@mail.ru.

Svetlana Y. Samoylova, Senior Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics of IWEP SB RAS, ul. Molodezhnaya, 1, Barnaul, 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-3365-0048; e-mail: bastet@iwep.ru.

Поступила в редакцию / Received 29.05.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 18.06.2025.
Принята к публикации / Accepted 07.07.2025.

УДК 556.382 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-61-74*

Эколого-гидрогеохимическая оценка подземных вод разнотипных по антропогенной нагрузке сельских поселений Белгородской области

И.И. Косинова[1] ✉, **Ф.Н. Лисецкий**[2], **В.А. Бударина**[1]

✉ kosinova777@yandex.ru

[1]*Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия*
[2]*Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Проблема взаимовлияния поверхностных и подземных вод приобретает особую значимость для агропромышленных регионов, в которых происходит интенсивная эксплуатация водоносных горизонтов как для хозяйственного и питьевого водоснабжения, так и при дренировании воды в зоне действия горнодобывающих предприятий. Именно к таким регионам относится Белгородская область, для которой проведена сравнительная эколого-гидрогеохимическая оценка подземных вод в двух контрастных сельских поселениях с сильной техногенной нагрузкой, включающей воздействие горнодобывающего комплекса, и фоновой территорией, где доминирует агропромышленное производство. **Методы.** Эмпирическая основа исследования для оценки экологического состояния подземных вод обеспечена массивом данных по содержанию макро- и микроэлементов в подземных водах из водозаборных скважин, колодцев, водонапорных башен. **Результаты.** Подземные воды верхне-нижнемелового комплекса, которые по химическому составу относятся к гидрокарбонатно-сульфатным кальциевым и имеют минерализацию 0,5–0,6 г/л, наиболее широко используются для снабжения водой промышленных предприятий и городов, сельских поселений и животноводческих комплексов. Установлено, что воды этого комплекса для фоновой территории имеют показатели микроэлементов, не превышающие предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для питьевых вод, тогда как для территории с техногенным прессингом основными загрязнителями выступают свинец, кадмий и медь. Влияние разных типов антропогенных нагрузок и их интенсивности проявляется в изменении природного режима водоносных горизонтов, скорости процессов выщелачивания и дальнейшего загрязнения, что определяет целесообразность разработки и внедрения дифференцированных комплексов мероприятий для поддержания качества подземных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: загрязняющие вещества, тяжелые металлы, макрокомпоненты, коэффициент концентрации, водоносные горизонты и комплексы, эколого-гидрогеохимические исследования, питьевая вода, горнорудная промышленность, агропромышленный комплекс, водоохранные мероприятия.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FZWG-2025-0006.

Для цитирования: Косинова И.И., Лисецкий Ф.Н., Бударина В.А. Эколого-гидрогеохимическая оценка подземных вод разнотипных по антропогенной нагрузке сельских поселений Белгородской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 61–74. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-61-74, EDN: OHIZSZ

© Косинова И.И., Лисецкий Ф.Н., Бударина В.А., 2025

Ecological and hydrogeochemical assessment of groundwater for rural settlements of the Belgorod region with different types of anthropogenic load

Irina I. Kosinova[1] ✉, **Fedor N. Lisetskiy**[2], **Victoria A. Budarina**[1]

✉ kosinova777@yandex.ru

[1] *Voronezh State University, Voronezh, Russia*
[2] *Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The problem of the mutual influence of surface and ground waters is of particular importance for agro-industrial regions where intensive exploitation of aquifers occurs, both for domestic and drinking water supply, and for water drainage in the area of mining enterprises. Belgorod Oblast is one of such regions, for which a comparative ecological and hydrogeochemical assessment of ground waters was carried out in two contrasting rural settlements with a strong technogenic load, which includes the impact of the mining complex, and a background territory where agro-industrial production dominates. **Methods.** The empirical basis of the study for assessing the ecological state of groundwater was provided by an array of data on the content of macro- and microelements in groundwater from water intake wells, wells, and water towers. **Results.** Groundwater of the Upper-Lower Cretaceous complex, which by chemical composition are hydrocarbonate-sulphate calcium and have a mineralization of 0.5–0.6 g/l, are most widely used to supply water to industrial enterprises and cities, rural settlements and livestock complexes. It was found that the waters of this complex for the background territory have trace element indicators that do not exceed the maximum permissible concentrations (MPC) established for drinking water, while for the territory with strong technogenic pressure, the main pollutants are lead, cadmium and copper. The impact of different types of anthropogenic loads and their intensity is reflected in the change in the natural regime of aquifers, the rate of leaching processes and further pollution, which determines the feasibility of developing and implementing differentiated sets of measures to maintain the quality of groundwater.

KEYWORDS: pollutants, heavy metals, macro/components, concentration coefficient, aquifers and complexes, ecological and hydrogeochemical studies, drinking water, mining industry, agro-industrial complex, water protection measures.

Funding: The research has been made with financial support of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the frameworks of governmental assignment No. FZWG-2025-0006.

For citation: Kosinova I.I., Lisetskiy F.N., Budarina V.A. Ecological and hydrogeochemical assessment of groundwater for rural settlements of the Belgorod region with different types of anthropogenic load. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 3. P. 61–74. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-61-74, EDN: OHIZSZ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в нашей стране большое внимание уделяется развитию сельских поселений. Одним из ключевых аспектов этого развития является их качественное водоснабжение [1–3]. Изучение потенциала ресурсов подземных вод для обеспечения сельских территорий достаточным по объемам и качеству питьевым водоснабжением активно проводится как в России [4–6], так и в зарубежных странах [7–9]. Современные подходы к геоэкодиагностике региона сочетают эколого-географический анализ, выясняющий степень пригодности среды жизнедеятельности человека, и медико-географический подход, определяющий вклад и степень воздействия комплекса факторов среды на уровень здоровья человека [10].

Для сельских районов комплексная водохозяйственная оценка предполагает учет как природно-экологических, так и водохозяйственных параметров, характеризующих системы питьевого водоснабжения [11]. При этом большое значение имеет ответственный выбор наиболее информативных и значимых с точки зрения целевой функции (обеспечения необходимого количества и качества питьевой воды) мониторинговых показателей водоносных горизонтов в конкретных природно-хозяйственных условиях [12–16]. Качество грунтовых вод и сопряженных с ними верхних водоносных горизонтов в условиях близкого залегания трещиноватых меловых пород зависит от поверхностных вод, в т. ч. речного стока в бассейнах интенсивного агропромышленного освоения [17–18]. Такие условия характерны для территории Белгородской области, где с 2022 г. проводится расчистка земснарядом водных объектов, количество которых (участки речных русел и водохранилищ, пруды) по завершению региональной программы должно составить 740 [19].

В сельской местности водоснабжение часто осуществляется за счет одиночных скважин. Однако необходимо учитывать, что подземные воды могут быть загрязнены, причем перечень загрязняющих веществ тесно связан с принадлежностью муниципального образования к той или иной отрасли экономики (горнодобывающей, аграрной, лесопромышленной и т. д.). В этой связи разработку природоохранных мероприятий целесообразно проводить на основе сравнительной оценки эколого-гидрогеохимической обстановки. Такой подход позволит сформировать дифференцированный перечень мероприятий, чтобы гарантировать безопасность и качество питьевой воды для жителей сельских поселений [3].

Объект настоящего исследования – подземные воды Быковского (Яковлевский городской округ) и Новоуколовского (Красненский район) сельских поселений Белгородской области (рис. 1). Данные сельские поселения различаются по природно-хозяйственной ситуации. Территория Быковского сельского поселения входит в состав Северско-Донецкого гидрогеологического района (с запасами пресных вод 295 тыс. $м^3$/сут) и подвержена техногенной нагрузке (со стороны горнодобывающей промышленности, развитой автотранспортной сети с высоким трафиком) наряду с активным агропромышленным освоением. Территория Новоуколовского поселения входит в состав Придонского

гидрогеологического района (с запасами пресных вод 70 тыс. м^3/сут) и характеризуется относительно низкой техногенной нагрузкой (отсутствием крупных автомагистралей) при преобладании предприятий сельского хозяйства (доля сельскохозяйственных земель составляет 97 %).

Цель работы заключалась в сравнительном анализе результатов эколого-гидрогеохимической оценки подземных вод для сельских поселений Белгородской области, различающихся хозяйственной специализацией (горнодобывающий и агропромышленный комплексы), для дифференцированного выбора мероприятий по поддержанию качества подземных вод.

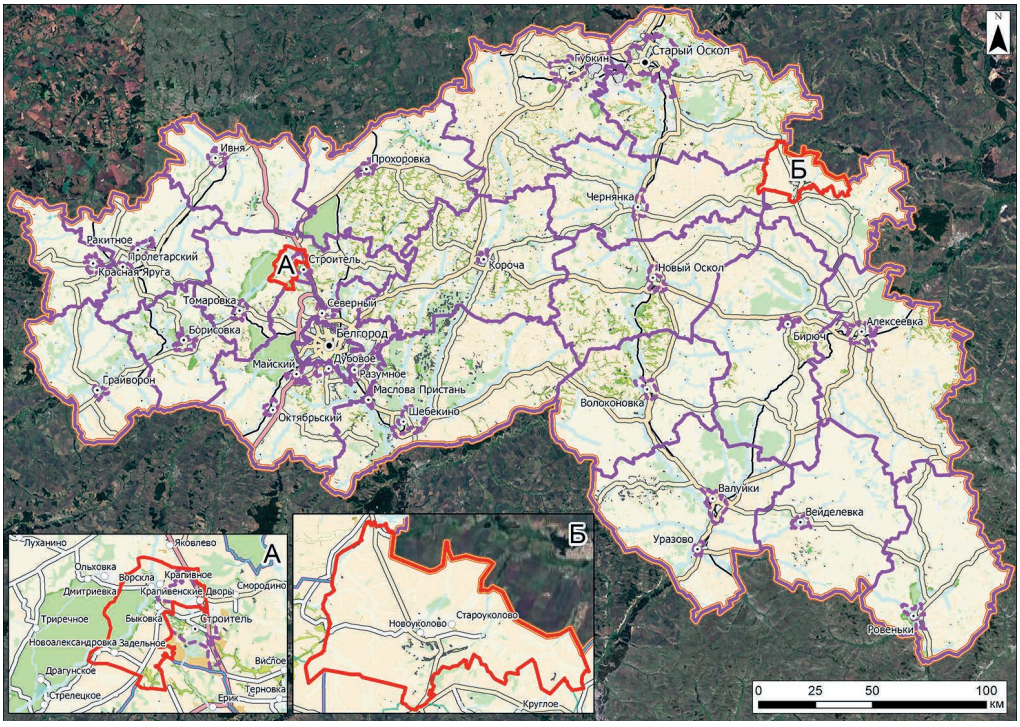


Рис. 1. Картосхема расположения Быковского (А) и Новоуколовского (Б) сельских поселений.
Fig. 1. Map-scheme of the location of Bykovskoye (А) and Novoukolovskoye (Б) rural settlements.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб подземных вод производили из водонапорных цельнометаллических башен, колодцев и водозаборных скважин частных домохозяйств, родников. В Быковском и Новоуколовском сельских поселениях отобрано 13 и 7 проб подземных вод соответственно. Пробы подземных вод отбирали согласно ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб»[1], затем они были проанализированы в аккредитованной лаборатории НИИ геологии

[1] ГОСТ Р 59024-2020 Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 36 с.

Воронежского госуниверситета на макрокомпоненты и в Белгородском государственном национальном исследовательском университете атомно-эмиссионным спектрометрическим методом (АЭС, AES) на эмиссионном спектрометре параллельного действия с индуктивно-связанной плазмой Shimadzu ICPE-9000 на микрокомпоненты.

Выбор оценочных показателей загрязнения подземных вод был основан на практике сопряженных геохимических и эколого-гигиенических исследований компонентов окружающей среды. Расчет коэффициента концентрации относительно установленных нормативных величин ОДК (ПДК) проводили по соотношению:

$$K_{\text{ОДК (ПДК)}} = \frac{C_i}{\text{ОДК (ПДК)}}, \quad (1)$$

где C_i – фактическое содержание i-го химического элемента в пробе, мг/дм^3.

Коэффициент концентрации макро- и микрокомпонентов (K_{ci}) характеризует интенсивность аномалии относительно выбранных фоновых показателей:

$$K_{ci} = \frac{C_i}{C_{\phi i}}, \quad (2)$$

где $C_{\phi i}$ – фоновое содержание i-го химического элемента в пробе.

Фоновые значения для определявшихся в исследовании макро- и микрокомпонентов в подземных водах были приняты по ранее полученным результатам обобщения содержания химических элементов в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата [20]. Диаграммы Стиффа [21] использованы для графического представления макрокомпонентного состава вод по их концентрациям (мг-экв/л). Оценка экологического состояния подземных вод проведена по пяти качественным категориям, учитывающим гидрогеохимическую обстановку (токсичные химические элементы, макрокомпоненты) и ПДК по трем классам опасности согласно СанПиН 1.2.3684-21.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В региональном плане (для всей территории Белгородской области) централизованное водоснабжение в основном базируется на использовании через буровые скважины вод турон-маастрихтского ($K_{2t\text{-}m}$) и альб-сеноманского ($K_{al\text{-}s}$) водоносных горизонтов. Первый из них характеризуется мощностью 70–80 м, а второй – 20–40 м при близких показателях минерализации вод (от 0,4 до 0,9 г/л) и повышенном содержании природных компонентов (жесткость, железо общее) [22]. Однако в некоторых сельских населенных пунктах питьевое водоснабжение обеспечивают палеогеновые и четвертичные водоносные горизонты, из которых воду извлекают при помощи шахтных колодцев. Для территорий Быковского и Новоуколовского сельских поселений основным эксплуатационным водоносным комплексом выступает меловая водоносная система (объединенный верхне-нижнемеловой комплекс ($K_{1\text{-}2}$)). Однако наряду с этим значительный вклад в водоснабжение вносит современный аллювиальный комплекс (al-IV) для Быковского сельского поселения, а для Новоуколовского – нижне-верхнечетвертичный аллювиальный комплекс (al-III). Аллю-

виальный комплекс al-IV стратиграфически расположен над палеогеновой водоносной системой (как правило, на плакорах) и верхнемеловым водоносным комплексом (чаще в геоморфологических условиях флювиальной и эрозионной сети). В долинно-речных ландшафтах водосодержащими породами выступают разнозернистые пески, но верхние слои разрезов часто вмещают суглинки и глины. Глубины залегания вод составляют, как правило, 15 м. Этот комплекс используют для водообеспечения небольших сельских поселений при помощи колодцев. Следует отметить, что с учетом слабой защищенности этих горизонтов от загрязнения часто вода не соответствует требованиям СанПиН «Питьевая вода».

Четвертичный аллювиальный комплекс (al-III) распространен в долинах малых рек, длина которых в регионе, по новым данным, составляет 4 564 км [22], и приурочен к отложениям террас, где он выступает первым водоносным горизонтом. Если в разрезах I и II террас водосодержащими породами выступают разнозернистые пески и супеси, то в отложениях террас высоких гипсометрических уровней долинно-речных ландшафтов это глины, суглинки, а также пески с супесью. Обычно водоносный горизонт залегает на глубинах от 2 до 10 м, однако на III–IV террасах уровень приближен к 2–5 м. Этот комплекс слабоводоносный, воды находят применение в сельской местности в целях локального водоснабжения. К видам хозяйственной деятельности, которые приводят к загрязнению слабозащищенных водоносных комплексов вблизи сельских поселений, относятся воздействия от гидродинамически пассивных объектов: неблагоустроенных периферийных селитебных зон, полигонов захоронения и свалок бытовых отходов, складов удобрений и ядохимикатов и т. п. Эти проблемы проявляются и в зонах санитарной охраны.

Меловая водоносная система ($K_{1\text{-}2}$) включает турон-маастрихтский терригенно-карбонатный комплекс ($K_{2t\text{-}m}$) и локально слабоводоносный альб-сеноманский терригенный комплекс ($K_{al\text{-}s}$). Эта система представлена в регионе повсеместно, она является основной для централизованного водоснабжения, однако в Поосколье отложения туронского яруса размыты в пределах распространения четвертичного аллювия. Подземные воды водоносного комплекса ($K_{2t\text{-}m}$) находятся в толщах белого и желтовато-белого мела и мергелей с количеством песка 15–20 % только у кровли. Горизонт умеренно водообилен, но на плакорах этот потенциал сильно снижен и потому нередко скважины обнаруживаются безводными. В междуречьях водоносная система обеспечивается питанием при инфильтрации атмосферных осадков. На территории исследования, которая преимущественно располагается на плакорах, водообильность комплексов невысокая. Тем не менее водные ресурсы этой системы широко применяются для снабжения сельских населенных пунктов и крупных животноводческих комплексов. В Белгородской области масштабы развития животноводства приобрели в последние годы небывалый размах, поэтому остро стоят проблемы биогенного загрязнения вод и утилизации животноводческих стоков. В местах концентрации животноводческих комплексов особенность геохимических потоков определяется значительной концентрацией азота и

фосфора, попадающих со стоками на сельскохозяйственные земли, и постепенным их вымыванием в грунтовые воды [23].

Водоносный комплекс ($K_{al\text{-}s}$) – это основной эксплуатируемый горизонт на северо-востоке и востоке региона, где он залегает уже с первых десятков метров и является напорным. В пределах территории изученных сельских поселений источники питания водоносного комплекса находятся за их пределами, где обеспечиваются инфильтрацией атмосферных осадков, однако значимый вклад вносит также переток из сопредельных горизонтов, имеющих гидравлическую связь. В границах изучаемых сельских поселений водные ресурсы этой системы извлекаются одиночными скважинами для снабжения населенных пунктов, которые по большей части размещены на водораздельных пространствах.

Сравнительная эколого-гидрогеохимическая оценка обстановки в контрастных сельских поселениях (табл. 1) не только определяет ее специфику по ключевым факторам сравнения [24], но и ориентирует на формирование дифференцированного перечня природоохранных мероприятий, направленных на обеспечение нормативного качества питьевой воды для жителей сельских поселений с разнотипным антропогенным прессингом.

Состав подземных вод по макрокомпонентам для Быковского сельского поселения был оценен по данным опробования в овражной форме левого берега долины р. Ворсклы по 13 мониторинговым точкам с использованием диаграмм Стиффа, которые отображают эквивалентный состав воды. Состав подземных вод по макрокомпонентам для Новоуколовского сельского поселения оценен по данным пяти мониторинговых точек.

Содержание макро- и микроэлементов – это основные параметры, используемые для оценки экологического состояния подземных вод. Признавая огромную роль глобальных и региональных стратегий по контролю над истощением грунтовых вод, специалисты-гидрогеологи призывают содействовать переходу от регионального масштаба к масштабу водоносного горизонта [1].

Ключевые индикаторы загрязнения вод, по данным из таких источников, как колодцы и родники, распространяли на весь водоносный горизонт в пределах исследуемой сельской территории. При сравнительной эколого-гидрогеохимической оценке обстановки в Быковском и Новоуколовском сельских поселениях выявлено, что потенциальным фактором загрязнения в Быковском сельском поселении является влияние горнодобывающей деятельности и перерабатывающего предприятия Яковлевского ГОКа, а в Новоуколовском – территорий складирования удобрений и продуктов жизнедеятельности из неканализованных домовладений.

Эксплуатируемыми водоносными горизонтами являются: аллювиальный водоносный комплекс (al-IV) (Быковское сельское поселение); нижне-верхнечетвертичный аллювиальный водоносный комплекс (al-III) (Новоуколовское сельское поселение); меловая водоносная система (K1-2) для обеих территорий. Подземные воды принадлежат к типам: гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые с минерализацией 0,5–0,6 г/л и общей жесткостью 5–7 мг-экв/л (Быковское сельское поселение), гидрокарбонатно-сульфатные, кальциево-

Таблица 1. Сравнительная эколого-гидрогеохимическая оценка Быковского и Новоуколовского сельских поселений Белгородской области
Table 1. Comparative ecological and hydrogeochemical assessment of Bykovsky and Novoukolovsky rural settlements of the Belgorod region

Фактор сравнения	Быковское сельское поселение	Новоуколовское сельское поселение
Потенциальный фактор загрязнения	Влияние горнодобывающей деятельности и перерабатывающего предприятия Яковлевского рудника	Поступление химикатов с аграрно освоенных водосборов и продуктов жизнедеятельности из неканализированных домовладений
Эксплуатируемые водоносные горизонты	Аллювиальный водоносный комплекс (al-IV); верхне-нижнемеловой комплекс (K_{1-2})	Нижне-верхнечетвертичный аллювиальный водоносный комплекс (al-III); верхне-нижнемеловой комплекс (K_{1-2})
Формула состава воды	$M_{0,62-0,69}\frac{HCO_3\,(64–77)\ Cl\,(5–24)\ SO_4\,(12)\ NO_3\,(0–5)}{Ca\,(66–75)\ Mg\,(20–27)\ Na+K\,(4–6)\ NH_4\,(0–1)}$ PH 7,2 – 7,4 $M_{0,54-0,74}\frac{HCO_3\,(60–76)\ SO_4\,(10–24)\ Cl\,(7–16)\ NO_3\,(0–6)}{Ca\,(55–73)\ Mg\,(19–41)\ Na+K\,(3–19)\ NH_4\,(0–1)}$ PH 7,0 – 7,5	$M_{0,36-0,41}\frac{HCO_3\,(79–81)\ SO_4\,(9–12)\ Cl\,(7–12)\ NO_3\,(0–1)}{Ca\,(69)\ Mg\,(17–24)\ Na+K\,(7–13)\ NH_4\,(0)}$ PH 7,1 – 7,2 $M_{0,36-0,41}\frac{HCO_3\,(79–81)\ SO_4\,(9–12)\ Cl\,(7–12)\ NO_3\,(0–1)}{Ca\,(69)\ Mg\,(17–24)\ Na+K\,(7–13)\ NH_4\,(0)}$ PH 7,1 – 7,2
Тип подземных вод	Гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые с минерализацией 0,5–0,6 г/л и общей жесткостью 5–7 мг-экв/л	Гидрокарбонатно-сульфатные, кальциево-магниевые с минерализацией от 0,5 до 0,9 г/л
Ведущие загрязняющие элементы	В водах верхне-нижнемелового водоносного комплекса загрязнителями по микрокомпонентам являются Cd, Pb, Cu, по макрокомпонентам – общая жесткость. В водах аллювиального комплекса превышения микрокомпонентов не установлены	Ключевой загрязнитель подземных вод верхне-нижнемелового водоносного комплекса по макрокомпонентам – общ. жесткость. В водах нижне-верхнечетвертичного превышений относительно ПДК не выявлено
Состояние колодцев и зон санитарной охраны	Состояние зон санитарной охраны в точках наблюдения 134, 145 является неудовлетворительным	Состояние зон санитарной охраны в трех точках наблюдения неудовлетворительно
Оценка степени загрязнения поземных вод (%)	Оценка степени загрязнения подземных вод по элементам 1, 2 и 3-го классов опасности соответствует категориям «допустимая» (18 %), в связи с наличием превышения ПДК по общей жесткости и магнию считаем ее условной, и «умеренно опасная» (45 %), «опасная» (10 %) и «высокоопасная» (27 %)	Оценка степени загрязнения подземных вод по элементам 1, 2 и 3-го классов опасности соответствует категориям «допустимая» (85 %) и «умеренно опасная» (15 %)

магниевые с диапазоном минерализации 0,5–0,9 г/л (Новоуколовское сельское поселение). Распределение категорий оценок степени загрязнения подземных вод микроэлементами выразительно показывает различия сельских территорий с разнотипными антропогенными нагрузками (рис. 2). Так, состояние подземных вод в Новоуколовском сельском поселении отличается преобладанием допустимой категории загрязнения (85 % количества проб). В водах современного аллювиального водоносного комплекса наблюдается повышенная концентрация свинца. Для подземных вод в Быковском сельском поселении определена умеренно опасная степень загрязнения (45 %).

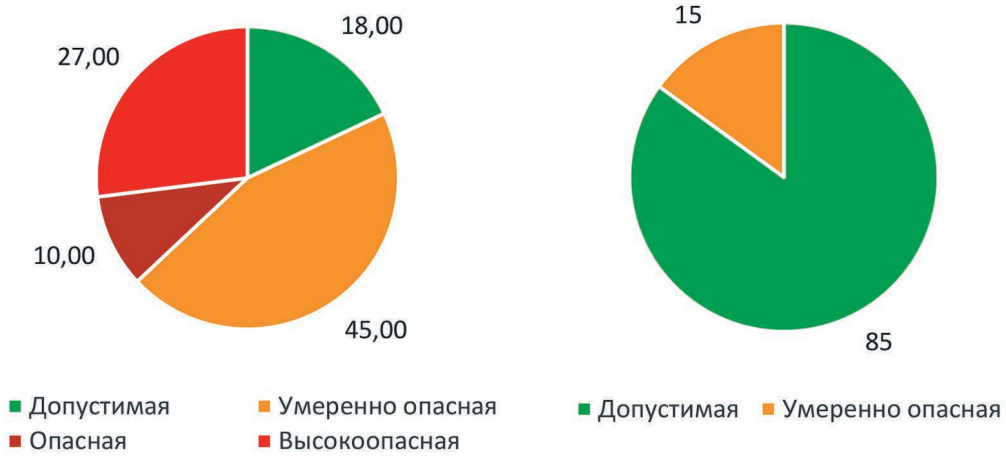


Рис. 2. Оценка степени загрязнения подземных вод (%) в Быковском и Новоуколовском сельских поселениях.
Fig. 2. Assessment of the degree of groundwater pollution (%) in Bykovsky and Novoukolovsky rural settlements.

Для Быковского сельского поселения в водах верхне-нижнемелового водоносного комплекса загрязняющими веществами являются: по микрокомпонентам – Cd, Pb, Cu, по макрокомпонентам – общая жесткость. В водах аллювиального комплекса превышения микрокомпонентов не установлены. В Новоуколовском поселении ключевой загрязнитель подземных вод верхне-нижнемелового водоносного комплекса по макрокомпонентам – общая жесткость. В водах нижне-верхнечетвертичного превышений относительно ПДК не выявлено. Неудовлетворительное состояние зон санитарной очистки установлено в Новоуколовском сельском поселении для трех мониторинговых пунктов, а в Быковском – в двух точках наблюдения (134 и 145), где уровень загрязнения подземных вод по поллютантам первых трех классов опасности можно отнести к категориям «высокоопасная» и «опасная» (27 % и 10 % соответственно), а распределение между категориями «умеренно опасная» и «опасная» составило 45 % и 10 % соответственно. Иные особенности степени загрязнения подземных вод по элементам 1, 2 и 3-го классов опасности характеризуют территорию Новоуколовского сельского поселения, где оценка распределяется между категориями «допустимая» (85 %) и «умеренно опасная» (15 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ макрокомпонентного состава подземных вод для фоновой территории (вне районов горнорудной промышленности) показал, что все показатели соответствуют ПДК. Однако в результате интенсивного использования водоносных горизонтов их природный режим трансформируется, а более активные процессы выщелачивания обусловливают повышение концентраций нитратов, сульфатов, гидрокарбонатов в сравнении с фоновыми параметрами (средним содержанием в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата).

Для сельских поселений с сильной техногенной нагрузкой качество грунтовых вод из современного аллювиального водоносного комплекса соответствует экологическим нормативам, тогда как грунтовые воды верхне-нижнемелового комплекса характеризуются превышением предельно допустимых концентраций по загрязнителям из второго (Cd, Pb) и третьего классов опасности (Cu). Результаты оценки степени загрязнения подземных вод элементами 2-го и 3-го классов опасности для фоновой территории показали, что 85 % и 15 % отобранных проб распределяются между «допустимой» и «умеренно опасной» категориями загрязнения соответственно. Состояние подземных вод в сельском поселении с сильным техногенным прессингом значительно дифференцировано между категориями загрязнения: на категорию «высокоопасная» приходится 27 % проб, на категорию «опасная» – 10 %, «умеренно опасная» – 45 % и «допустимая» – 18 %.

Сравнительная эколого-гидрогеохимическая оценка подземных вод на территории двух сельских поселений, различающихся профилями хозяйственной деятельности (горнодобывающий и агропромышленный комплексы), позволяет разработать дифференцированные комплексы мероприятий для поддержания качества подземных вод. На территории сельского поселения агрохозяйственного профиля этому будет способствовать реализация ряда мероприятий по приведению зон санитарной охраны к нормативным требованиям для предотвращения возможных проблем в будущем. Из-за того, что в 37 % отобранных проб на территории сельских поселений с сильной техногенной нагрузкой наблюдались опасная и высокоопасная степени загрязнения вод, рекомендуется использование фильтров грубой очистки для удаления крупных частиц и примесей, применение химических реагентов для осаждения тяжелых металлов и их последующего удаления, а также специальных фильтров (ионообменных или мембранных).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.С. Современное состояние нормативной базы в области водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 3. С. 4–13.
2. Валеев Т.К., Сулейманов Р.А., Орлов А.А., Бактыбаева З.Б., Рахматуллин Н.Р. Оценка риска здоровью населения, связанного с качеством питьевой воды // Здоровье населения и среда обитания. 2016. № 9 (282). С. 17–19.
3. Маркин В.Н., Раткович Л.Д., Глазунова И.В. Особенности методологии комплексного водопользования. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. 140 с.
4. Kornilov A.G., Kolmykov S.N., Petina M.A., Lebedeva M.G. Impact monitoring of mining enterprises of Kursk magnetic anomaly on hydro ecological river situation of the Belgorod region // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2015. Vol. 6. No. 4. P. 123–127.
5. Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Savchenkov M.F., Mylnikova I.V., Lisovtsov A.A. Quality of drinking water and risk to the health of the population of the south Baikal region (Russia) // Emerging Contaminants. 2024. Vol. 10. Issue 2. Article 100300. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100300.
6. Орлова Е.С., Заносова В.И., Рыбкина И.Д. Уровни залегания, условия питания и гидрохимия водоносных горизонтов бессточной области Обь-Иртышского междуречья (на примере степной части Алтайского края) // Географический вестник. 2024. № 1 (68). С. 71–86. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-1-71-86.
7. Kelly E.R., Cronk R., Kumpel E., Howard G., Bartram J. How we assess water safety: A critical review of sanitary inspection and water quality analysis // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 718. Article 137237. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137237.
8. Wang Y., Li P. Appraisal of shallow groundwater quality with human health risk assessment in different seasons in rural areas of the Guanzhong Plain (China) // Environmental Research. 2022. Vol. 207. Article 112210. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112210.
9. Fuentes N., Arriagada A., Pareja C., Molina-Roco M. Quality and influences of natural and anthropogenic factors on drinking water in rural areas of Southern Chile // Water. 2024. Vol. 16. No. 19. Article 2830. https://doi.org/10.3390/w16192830.
10. Куролап С.А., Яковенко Н.В., Федотов В.И., Михно В.Б., Костылева Л.Н. Геоэкологическая диагностика субъектов Центрального Черноземья // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14. № 1. С. 67–80. https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-1-67-80.
11. Орлова Е.С., Рыбкина И.Д. Эколого-водохозяйственная оценка как инструмент управления водопользованием и качеством жизни населения сельских территорий Алтайского края // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 4. С. 52–66. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-4-52-66.
12. Харина Г.В., Алешина Л.В. Оценка загрязнения питьевой воды Свердловской области тяжелыми металлами // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 124–134. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-1-124-134.
13. Kleyn S.V., Vekovshinina S.A. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health // Health Risk Analysis. 2020. No. 3. P. 48–59. https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06.eng.
14. Potyutko O.M. Assessment of ecological state of water bodies using integral hydro/biological and hydro/chemical indicators // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. Vol. 46. No. 8. P. 539–544. https://doi.org/10.3103/S1068373921080057.
15. Горбанев С.А., Степанян А.А., Исаев Д.С., Мозжухина Н.А., Еремин Г.Б., Мясников И.О. Обоснование выбора приоритетных показателей для контроля качества воды водоносных горизонтов // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 8. С. 842–849. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-8-842-849.
16. Иванютин Н.М., Подовалова С.В., Джапарова А.М. Интегральная оценка питьевых вод из подземных источников бассейна реки Салгир // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 5. С. 493–502. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-493-502.

17. Lisetskii F.N., Buryak Z.A. Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin // Water. 2023. Vol. 15. No. 13. Article 2443. https://doi.org/10.3390/w15132443.
18. Бродская Н.А., Мякишева Н.В., Александрова К.В. Оценка разномасштабного взаимодействия поверхностных и подземных вод // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 38. С. 36–50.
19. Lisetskii F., Kitov M., Spesivtseva A., Marinina O. Ecological assessment of bottom sediments for conditions of an agro-industrial region with high anthropogenic load // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 548. Article 01018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454801018.
20. Shvartsev S.L. Hydro/geochemistry of the hyper/genesis zone // Geochemistry international. 2000. Vol. 38. Suppl. 2. P. 260–276.
21. Stiff Jr H.A. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns // Journal of petroleum technology. 1951. Vol. 3. No. 10. P. 15–17. https://doi.org/10.2118/951376-G.
22. Реки и водные объекты Белогорья / под ред. Ф.Н. Лисецкого. Белгород: Константа, 2015. 362 с.
23. Корнилов А.Г., Киселев В.В., Курепина В.А., Лопина Е.М., Боровлев А.Э. Биогенное загрязнение водных объектов в сельскохозяйственных районах Белгородской области // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47. № 1. С. 76–87. https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87.
24. Косинова И.И., Закусилов В.П., Белозеров Д.А. Методика комплексной оценки трансформации приповерхностных водоносных горизонтов техногенно-нагруженных территорий // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2013. № 2. С. 162–170.

REFERENCES

1. Alekseev V.S. The current state of the regulatory framework in the field of water supply. *Water supply and sanitary technology.* 2014. No. 3. P. 4–13. (In Russ.).
2. Valeev T.K., Suleymanov R.A., Orlov A.A., Baktybaeva Z.B., Rakhmatullin N.R. Assessment of the public health risk associated with drinking water quality. *Public Health and Life Environment.* 2016. No. 9 (282). P. 17–19. (In Russ.).
3. Markin V.N., Ratkovich L.D., Glazunova I.V. Features of the methodology of integrated water management. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. 2016. 140 p. (In Russ.).
4. Kornilov A.G., Kolmykov S.N., Petina M.A., Lebedeva M.G. Impact monitoring of mining enterprises of Kursk magnetic anomaly on hydro ecological river situation of the Belgorod region. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015. Vol. 6. No. 4. P. 123–127.
5. Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Savchenkov M.F., Mylnikova I.V., Lisovtsov A.A. Quality of drinking water and risk to the health of the population of the south Baikal region (Russia). *Emerging Contaminants*. 2024. Vol. 10. Issue 2. Article 100300. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100300.
6. Orlova E.S., Zanosova V.I., Rybkina I.D. Levels of deposition, recharge conditions and hydrochemistry of aquifers of the Ob-Irtysh interfluve (a case study of the steppe part of the Altai territory). *Geographical bulletin*. 2024. No. 1 (68). P. 71–86. (In Russ.). https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-1-71-86.
7. Kelly E.R., Cronk R., Kumpel E., Howard G., Bartram J. How we assess water safety: A critical review of sanitary inspection and water quality analysis. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 718. Article 137237. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137237.
8. Wang Y., Li P. Appraisal of shallow groundwater quality with human health risk assessment in different seasons in rural areas of the Guanzhong Plain (China). *Environmental Research*. 2022. Vol. 207. Article 112210. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112210.
9. Fuentes N., Arriagada A., Pareja C., Molina-Roco M. Quality and influences of natural and anthropogenic factors on drinking water in rural areas of Southern Chile. *Water*. 2024. Vol. 16. No. 19. Article 2830. https://doi.org/10.3390/w16192830.
10. Kurolap S.A., Yakovenko N.V., Fedotov V.I., Mikhno V.B., Kostyleva L.N. Geoecological diagnostics of the subjects of the Central Chernozem region. Yug Rossiyi: ekologiya, razvitiye [*South of Russia: ecology, development*]. 2019. Vol. 14. No. 1. P. 67–80. (In Russ.). https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-1-67-80.

11. Orlova E.S., Rybkina I.D. Environmental and hydro/economic assessment as a tool for managing water use and life quality of population in rural territories of Altai Kray. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020. No. 4. P. 52–66. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-4-52-66.
12. Kharina G.V., Alyoshina L.V. Analysis of the quality of groundwater in the Sverdlovsk region. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020. No. 1. P. 124–134. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-1-124-134.
13. Kleyn S.V., Vekovshinina S.A. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health. *Health Risk Analysis*. 2020. No. 3. P. 48–59. https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06.eng.
14. Potyutko O.M. Assessment of ecological state of water bodies using integral hydro/biological and hydro/chemical indicators. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021. Vol. 46. No. 8. P. 539–544. https://doi.org/10.3103/S1068373921080057.
15. Gorbanev S.A., Stepanyan A.A., Isaev D.S., Mozzhukhina N.A., Eremin G.B., Myasnikov I.O. Justification of the priority indicators choice for water quality control in aquifers. *Hygiene and Sanitation*. 2022. Vol. 101. No. 8. P. 842–849. (In Russ.). https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-8-842-849.
16. Ivanyutin N.M., Podovalova S.V., Dzhaparova A.M. Integral assessment of drinking water from underground sources of the Salgir river basin. *Hygiene and Sanitation*. 2022. Vol. 101. No. 5. P. 493–502. (In Russ.). https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-493-502.
17. Lisetskii F.N., Buryak Zh.A. Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin. *Water*. 2023. Vol. 15. No. 13. Article 2443. https://doi.org/10.3390/w15132443.
18. Brodskaya N.A., Myakisheva N.V., Alexandrova K.V. The estimation of different scale surface and undersurface waters interrelation. *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2015. No. 38. P. 36–50. (In Russ.).
19. Lisetskii F., Kitov M., Spesivtseva A., Marinina O. Ecological assessment of bottom sediments for conditions of an agro-industrial region with high anthropogenic load. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 548. Article 01018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454801018.
20. Shvartsev S.L. Hydro/geochemistry of the hyper/genesis zone. *Geochemistry international*. 2000. Vol. 38. Suppl. 2. P. 260–276.
21. Stiff Jr H.A. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of petroleum technology*. 1951. Vol. 3. No. 10. P. 15–17. https://doi.org/10.2118/951376-G
22. Rivers and water bodies of Belogorie. Edited by F.N. Lisetskii. Belgorod: Constanta, 2015. 362 p. (In Russ.).
23. Kornilov A.G., Kiselev V.V., Kurepina V.A., Lopina E.M., Borovlev A.E. Biogenic pollution of water bodies in agricultural areas of the Belgorod region. *Regional Geo/systems*. 2023. Vol. 47. No. 1. P. 76–87. (In Russ.). https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87.
24. Kosinova I.I., Zakusilov V.P., Belozerov D.A. Integrated assessment methodology transformation upper aquifer layers technologically laden areas. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2013. No. 2. P. 162–170. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Косинова Ирина Ивановна, д-р геол.-минерал. наук, профессор, заведующий кафедрой экологической геологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1; Scopus ID-57190225627; РИНЦ ID-114754; ORCID: 0000-0002-9130-7926; e-mail: kosinova777@yandex.ru

Лисецкий Федор Николаевич, д-р геогр. наук, профессор, кафедры природопользования и земельного кадастра, Институт наук о Земле, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85; Scopus ID- 15731091700; РИНЦ ID- 118793; ORCID: 0000-0001-9019-4387; e-mail: fnliset@mail.ru

Бударина Виктория Александровна, канд. юрид. наук, доцент, кафедра экологической геологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1; Scopus ID-15731091700; РИНЦ ID- 731648; ORCID: 0000-0001-8091-0730; e-mail: budarinav@yandex.ru

About the authors:

Irina I. Kosinova, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Ecological Geology, Voronezh State University, Universitetskaya, 1, Voronezh, 394018, Russia; Scopus ID- 57190225627; e-mail: kosinova777@yandex.ru

Fedor N. Lisetskiy, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Department of Nature Management and Land Cadaster, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Pobedy, 85, Belgorod, 308015, Russia; Scopus ID- 15731091700; e-mail:fnliset@mail.ru

Victoria A. Budarina, Candidate of Legal Sciences, Associate Professor of the Department of Ecological Geology, Voronezh State University, Universitetskaya, 1, Voronezh, 394018, Russia; Scopus ID- 15731091700; e-mail: budarinav@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 17.02.2025
Поступила после рецензирования / Revised 16.03.2025
Принята к публикации / Accepted 15.07.2025.

УДК 556.552 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-75-93*

Оценка влияния урбанизации водосбора на водный баланс и водообмен Суздальских озер Санкт-Петербурга

М.Л. Марков ✉, Е.В. Гуревич, С.А. Иванова

✉ 2014mml@gmail.com

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Гидрологическое исследование посвящено изучению причин происходящего сокращения естественных водных ресурсов и водообмена Суздальских озер на территории Санкт-Петербурга. **Методы.** Сравнение характеристик основных элементов водного баланса озер в 1970-е годы и в 2024 г. с использованием данных эпизодических наблюдений за уровнем и расходами воды в гидросистеме Суздальских озер. Оценка изменений характеристик водного режима и водообмена выполнена с помощью статистических методов анализа гидрометеорологических характеристик. **Результаты.** Выявлены климатообусловленные и антропогенные причины происходящего снижения естественных водных ресурсов водоемов в летний меженный период.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Суздальские озера, реки Старожиловка и Каменка, антропогенное влияние на водный режим, водный баланс.

Для цитирования: Марков М.Л., Гуревич Е.В., Иванова С.А. Оценка влияния урбанизации водосбора на водный баланс и водообмен Суздальских озер Санкт-Петербурга // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 75–93. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-4-75-93; EDN: OHIZSZ

Assessment of urbanization impact on water balance and water exchange of Suzdal lakes in St. Petersburg

Mikhail L. Markov ✉, Elena V. Gurevich, Svetlana A. Ivanova

✉ 2014mml@gmail.com

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The hydrological study is devoted to the study of the reasons for the ongoing decrease of natural water resources and water exchange of Suzdal lakes on the territory of St. Petersburg. **Methods.** Determination of multiyear dynamics of the main elements of the lakes' water balance using the data of observations of water level and discharge in the Suzdal lakes hydrosystem. Assessment of changes in water regime characteristics was carried out using chronological, comparative, correlation and statistical methods of hydrometeorological characteristics analysis. **Results.** The climatic and anthropogenic reasons for the decrease of natural water resources of water reservoirs in the summer low-water period were revealed.

KEY WORDS: Suzdal lakes, Starozhilovka and Kamenka rivers, anthropogenic impact on water regime, water balance

© Марков М.Л., Гуревич Е.В., Иванова С.А., 2025

For citation: Markov M.L., Gurevich E.V., Ivanova S.A. Assessment of urbanization impact on water balance and water exchange of Suzdal lakes in St. Petersburg. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 4. P. 75–93. (in Russian). https://doi.org/10.35567/19994508-2025-4-75-93; EDN: OHIZSZ

ВВЕДЕНИЕ

Водосборы трех Суздальских озер, самых крупных водоемов Санкт-Петербурга, находятся под воздействием различных антропогенных факторов. Это постепенно, на протяжении полутора веков стало приводить к деградации их экологического состояния, ухудшению рекреационного потенциала.

В районе озер проживает около 0,5 млн жителей. В 2024 г. завершено комплексное благоустройства берегов Суздальских озер, и они стали местом притяжения петербуржцев со всех северных территорий города, а также из центра. Вместе с тем продолжающееся обмеление, заболачивание и зарастание озер, а в нижнем озере размножение синезеленых водорослей, вызывают озабоченность жителей. Был создан Общественный совет по спасению и реабилитации озер. Активная позиция совета не осталась без внимания, и городские власти приняли решение о разработке мероприятий по оздоровлению гидросистемы озер. Работа по обеспечению экологического благополучия Суздальских озер стала иметь «стратегическое значение» для Петербурга.

Так как ранее на озерах проводились регулярно только оценки качества воды, то впервые городом для проектирования эффективных мероприятий по оздоровлению были запланированы и выполнены комплексные гидрометеорологические и экологические изыскания гидросистемы. Они включали оценку в донных отложениях загрязнений и выявление источников их поступления как поверхностным путем, так и подземным; исследование состояния дна и берегов; определение причин активизации формирования синезеленых водорослей. Также была поставлена задача по исследованию формирования водного режима в условиях современного климата и произошедших масштабных антропогенных изменений на водосборной площади (застройка в начале XXI в. северо-запада города новым микрорайоном «Парнас», прокладка коммуникаций, сооружение кольцевой автомагистрали и т. д.).

Решение этих вопросов по заданию Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга взял на себя в 2023–2024 гг. Государственный гидрологический институт (ГГИ). Основная цель работы состояла в оценке изменения формирования водного режима гидросистемы Суздальских озер за последние 40–50 лет. Для достижения цели решались следующие задачи: организация системы гидрологических наблюдений на водотоках и озерах в разные сезоны; расчет и оценка изменений элементов водного баланса водоемов, произошедших к настоящему времени после масштабной застройки водосбора; разработка предложений по улучшению водного режима гидросистемы. Ниже представлены основные результаты этой работы.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водосбор гидросистемы Суздальских озер расположен в северо-западной части Санкт-Петербурга. Территория является частью водосборной площади озера Лахтинский разлив (бассейн Финского залива). В гидросистему входят соединенные между собой протоками озера Верхнее, Среднее и Нижнее Суздальские с общей площадью акваторий 1,02 км^2.

Характеристики озер следующие:

– Верхнее Суздальское озеро – средняя глубина 2,5–3,0 м (максимальная – 11 м), длина 600 м, ширина 450 м, площадь акватории 0,22 км^2;

– Среднее озеро – длина 400 м, ширина 250 м, площадь акватории 0,15 км^2;

– Нижнее (Большое) озеро – самое крупное из трех озер, имеет почти 2 км в длину и 600 м в ширину, площадь акватории 0,97 км^2, максимальная глубина около 4,5 м, у северной оконечности имеются обширные отмели. С северного берега в него впадает р. Старожиловка с площадью водосбора 33,8 км^2, которая является его основным притоком. Сток из системы озер осуществляется из Нижнего озера через р. Каменку в Лахтинский разлив, далее в Финский залив.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– обустройство временных гидрологических постов и проведение на них в течение года измерений расходов, уровней, температуры и минерализации воды;

– расчет элементов водного баланса гидросистемы Суздальских озер в годы различной водности с оценкой доли подземного стока в питании озер;

– разработка предложений по улучшению водного режима гидросистемы.

Исходными гидрологическими данными послужили:

– расходы и уровни воды на постах на реках-аналогах Росгидромета[1]: р. Каменка – исток у оз. Нижнего Суздальского (А = 36,6 км^2) в 1973–1975 гг.; р. Старожиловка – Шуваловский парк (А = 30,1 км^2) в 1974–1977 гг.; река-аналог Охта – д. Девяткино (А = 340 км^2) в 1932–2024 гг.;

– результаты гидрометрических работ ГГИ за период с ноября 2023 по июль 2024 г.;

– архивные материалы ГГИ 1940 г.[2];

– массивы метеорологических характеристик по метеостанциям Санкт-Петербург, Выборг и Белогорка[3] [1–4].

Так как регулярные гидрологические наблюдения на озерно-речной системе проводились только в 1970-е и в 2020-е годы, оценка произошедшего изменения водного режима выполнена лишь за последние 50 лет.

Оценка изменений характеристик водного режима осуществлена с помощью хронологического, сравнительного и корреляционного методов анализа гидрометеорологических характеристик. Расчеты речного стока выполнены в

[1] Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1973–77 гг. Т. 1. Вып. 5. Бассейны рек Балтийского моря, озер Ладожского и Онежского.
[2] Основные гидрологические характеристики оз. Большого Суздальского. Отчет Бюро гидрологических расчетов и справок при ГГИ. Архив ГГИ, 1940 г. 27 с.
[3] Единый государственный фонд данных (ЕГФД) ВНИИГМИ-МЦД.

соответствии с документами[4,5]. Для расчетов испарения с водной поверхности использовались методы, предложенные в документах[6,7,8,9] и работах [5–7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Водосбор Суздальских озер в целом расположен в черте города и, как следствие, в исторической ретроспективе подвергался значительному преобразованию подстилающей поверхности. До XIX в. на водосборе были сельхозполя, болота и леса. С северной и восточной сторон в оз. Нижнее Суздальское впадали многочисленные ручьи, которые исчезли к настоящему времени. Оз. Верхнее Суздальское в то время получало значительно больше питания с водосборной площади, и из него вытекал ручей Гнилой. Судя по картам XVII в., этот ручей был началом существующей в настоящее время Черной речки.

Первый этап преобразования водосбора и антропогенного влияния на водный режим этой территории связан с ее заселением с 1755 г. в результате образования больших крестьянских слобод [8, 9] и с начавшимся осушением болот и заболоченных территорий. К концу XIX в. все окрестности озер активно застраивались. Осушение заболоченной местности и болот происходило с разной интенсивностью в течение длительного времени и способствовало первоначальному повышению поверхностного стока воды в результате дренирования болот и сработки запасов воды с переувлажненных земель. В течение XIX в. густота мелиоративной сети заметно увеличивалась, и к началу XX в. территории, расположенные южнее и восточнее Верхнего и Среднего озер, а также между Средним и Нижним, были полностью преобразованы. К 1950-м годам вся заболоченная водосборная площадь р. Старожиловки и Суздальских озер была осушена и на ее месте произведена выработка торфяников. Мелиорация почти всей этой территории необратимо изменила ее ландшафт и естественный водный режим как подстилающей поверхности, так и водных объектов.

Второй качественный этап преобразования водосборной площади Суздальских озер и р. Старожиловки связан с ее интенсивной городской застройкой в конце XX – начале XXI в., в результате которой продолжились изменения условий формирования водного режима реки и озер (рис. 1).

В результате антропогенного преобразования территории произошло изменение границ водосборной площади гидросистемы Суздальских озер как

[4] СП 529.1325800.2023. Свод правил. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.
[5] СТП ВНИИГ 210.01.ТНТ-2010. Методика расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий. СПб.: ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2010.
[6] ВМО № 8. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Женева: Всемирная метеорологическая организация, 2017. 1400 с.
[7] Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.
[8] Стандарт организации СТО ГГИ 52.08.37-2015 «Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу средних многолетних изменений»: СПб.: ART-XPRESS, 2015. 40 с.
[9] Приказ МПР РФ от 30.11.2007 № 314 «Об утверждении Методики расчета водохозяйственных балансов водных объектов». Зарег. в Минюсте РФ 29.12.2007 № 10861 (Электронный ресурс). URL: http://sudact.ru/law/prikaz-mpr-rf-ot-30112007-n-314/metodika-rascheta-vodokhoziaistvennykh-balansov-vodnykh/.

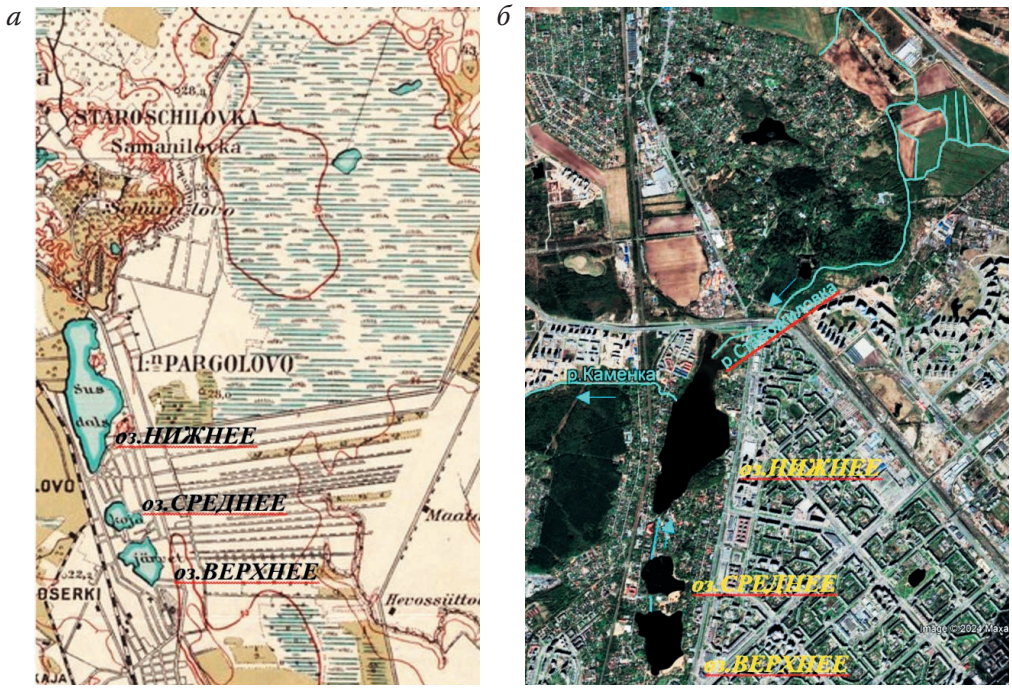


Рис. 1. Водосбор Суздальских озер:
а – финская карта 1920 г.; *б* – космоснимок 27.09.2020.
Fig. 1. Catchment area of the Suzdal lakes:
a – Finnish map from 1920; *b* – satellite image from 27.09.2020.

в целом, так и по отношению к отдельным водным объектам. Этот вывод сделан на основе сравнения архивных материалов ГГИ 1940 г.[2] с современными характеристиками. Так, в 1940 г. площадь поверхностного водосбора Нижнего (Большого) Суздальского озера была принята равной 44 км^2, из которых 32 км^2 относились к р. Старожиловке, а 12 км^2 – к суммарной площади водосбора трех озер. Современная общая площадь водосбора гидросистемы Суздальских озер (включая р. Старожиловку) составляет 36,2 км^2, в т. ч. р. Старожиловки – 33,8 км^2 (что, в общем, близко к величине 1940 г.). Сокращение водосборной площади в большей степени пришлось на долю водоемов.

Сравнение данных показало, что с 1940 г. произошло уменьшение почти на 8 км^2 площади водосбора оз. Нижнего Суздальского, включающей площадь р. Старожиловки и трех озер, с 44 км^2 до 36,2 км^2. Это сокращение произошло за счет уменьшения суммарной площади водосбора трех озер (с 12 км^2 до 2,5 км^2). В результате разность дает величину уменьшения на 9,5 км^2, а не 8 км^2, что, возможно, связано со сложностями определения линий водоразделов на антропогенно нарушенной территории. Следует отметить, что в питании озер большую роль играют подземные воды. Водосбор подземных вод отличается от поверхностного и, возможно, тоже претерпел изменения из-за сооружения многочисленных подземных коммуникаций. Значения площадей зеркал озер в ранний и поздний годы близки по величине, и их отличие может быть обусловлено разной водностью в периоды выполнения топографических работ.

Масштабная застройка водосборной территории за последние 50 лет изменила условия стекания воды. Увеличение площади водонепроницаемых поверхностей снизило питание подземных вод атмосферными осадками. Большая часть поверхностного стока с застроенной территории стала отводиться ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по сети ливневой канализации на очистные сооружения за пределы озерно-речной гидросистемы.

Водный баланс озер

Оценка влияния урбанизации на водный режим Суздальских озер выполнена методом сравнения стоковых составляющих водного баланса, определенных по двум восстановленным условно-естественным многолетним рядам их значений по данным режимных гидрометрических наблюдений в 1970-е годы и в 2023–2024 гг. Ряды стоковых характеристик получены путем приведения кратковременных наблюдений каждого из двух временных отрезков к многолетним данным по реке-аналогу Охте – д. Девяткино. В результате мы имеем два ряда условного стока за 87 лет. Один ряд характеризует формирования стока, как если бы на водосборе были постоянными антропогенные условия, характерные для 1970-х годов, второй – для его современного состояния. Изменения стока, связанные с изменением метеорологических условий за многолетний период, учитываются за счет использования в расчетах данных о стоке реки-аналога Охты, водосбор которой за почти сто лет не подвергся существенной урбанизации.

Составляющие водного баланса озер рассчитаны по годовым значениям, т. к. помесячных данных недостаточно из-за слабой гидрометеорологической изученности объектов.

Расчет элементов водного баланса выполнен для лет с разной обеспеченностью атмосферными осадками: высокой (P = 25 %), средней (P = 50 %), маловодной (P = 75 %).

Атмосферные осадки

В расчетах использованы данные месячных сумм осадков: с 1966 по 2015 г. включительно, скорректированные по методике ГГО (с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов); с 2016 по 2024 г. включительно – стандартные. За почти столетний период наблюдений отмечается рост количества осадков (рис. 2). Основной прирост происходит в июле, августе и в зимний период, а снижение – в мае, июне и сентябре. При этом в последнее десятилетие увеличилась повторяемость очень низких сентябрьских осадков.

Исследованиями[2] показано, что количество атмосферных осадков по данным наблюдений за период с 1890 по 1925 г. в метеорологической обсерватории Санкт-Петербургского (Ленинградского) лесного института, расположенной в непосредственной близости к озерам (4,6 км), было в среднем на 15 % больше, чем по данным метеостанции (м/с) Санкт-Петербург, а в отдельные годы эта разница составляла 25–30 %. Поэтому при расчете элементов водного баланса количество атмосферных осадков скорректировано на ту же среднюю величину – 15 %. Отметим, что по многолетним наблюдениям ГГИ на болоте

Ламмин-Суо [10, 11], расположенном в 33 км от Суздальских озер и в 7 км от Невской губы, среднее многолетнее количество атмосферных осадков составляет 850 мм, что больше на 184 мм, чем на м/с Санкт-Петербург (665 мм). И есть все основания предполагать, что принятое для озер увеличение атмосферных осадков на 15 % скорее их занижает, чем завышает.

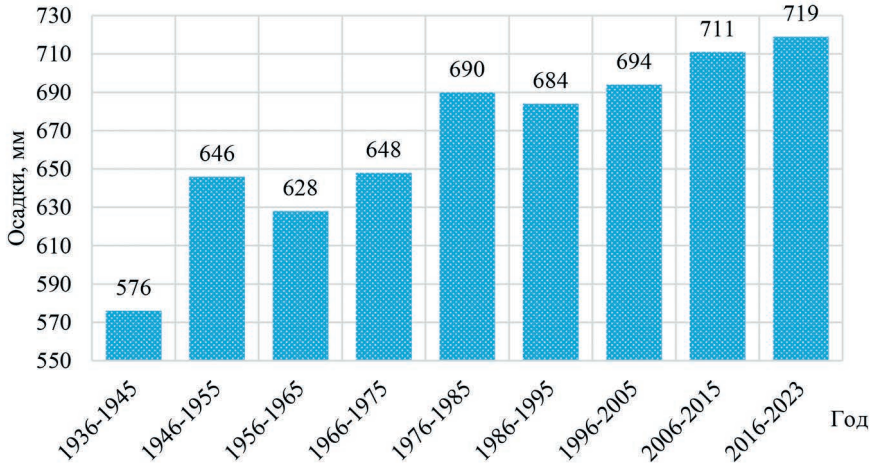


Рис. 2. Средние годовые атмосферные осадки за пятилетние периоды по метеостанции Санкт-Петербург.
Fig. 2. Mean annual precipitation for five-year periods for the meteorological station St. Petersburg.

В табл. 1 приведено распределение осадков в годы разной увлажненности (по годовой величине осадков). Оценка маловодных и многоводных лет основывалась на вероятностной оценке величины атмосферных осадков для теплого периода (апрель – октябрь).

Таблица 1. Распределение осадков по месяцам в годы разной увлажненности, мм
Table 1. Distribution of precipitation by months in years of different moisture content, mm

Обеспеченность, %	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
25	50,8	33,2	48,4	20,7	40,4	73,9	108,8	83,1	85,8	69,4	59,6	59,8	734
50	39,1	41,4	43,1	27,8	45,0	60,4	72,6	109,8	49,4	70	44,5	62,5	666
75	38,5	36,9	18,1	33,4	39	37,1	73,5	81,3	27,5	73,1	52,9	43,3	554

Испарение с водной поверхности

В расчетах использовались данные метеорологических характеристик (температура и относительная влажность воздуха, осадки, скорость ветра, дефицит насыщения водяного пара) по м/с Санкт-Петербург. Существует два основных способа оценки испарения: инструментальный (прямой метод непосредственного измерения слоя испарившейся воды с помощью водных испарителей[6]) и расчетный (посредством различных эмпирических формул[7]). Однако отсутствие данных о температуре воды и скорости ветра на высоте 2 м над поверхностью озер сделало невозможным использование разработанной в ГГИ формулы для расчета испарения[6], позволяющей получать наиболее достоверные величины. Поэтому были использованы два независимых друг от друга метода, опирающиеся на различные метеорологические характеристики: метод Н.Н. Иванова [5] и метод В.К. Давыдова [6]. Разница оценок испарения, полученных с использованием двух методов, составляет не более 6 %. Сравнение их итоговых оценок позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов. Для расчетов принята средняя величина по двум методам.

Оценки величины испарения проводились на основании рекомендаций стандарта организации СТО ГГИ 52.08.37-2015[8]. Расчет испарения с водной поверхности для малых водоемов проводился согласно Указаниям по расчету испарения с поверхности водоемов[7], а также Методике расчета водохозяйственных балансов водных объектов[9].

Установлено, что с 2006 г. наблюдается устойчивый рост величины испарения (рис. 3). Для исследования возможных причин, вызвавших такую тенденцию, проведены расчеты величин испарения для близких к Санкт-Петербургу метеостанций Выборг и Белогорка, которые показали, что определенный рост испарения в последние десятилетия наблюдается только для Санкт-Петербурга.

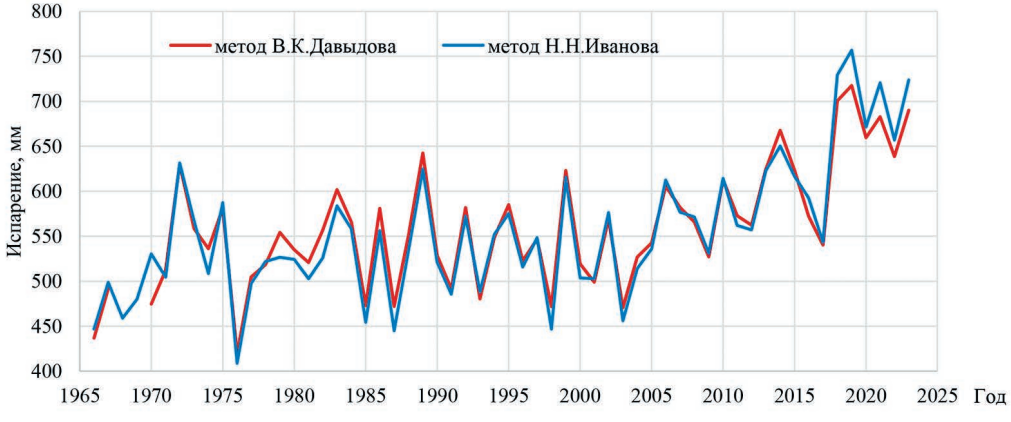


Рис. 3. Изменение расчетной суммарной величины испарения с водной поверхности за год по данным метеостанции Санкт-Петербург.
Fig. 3. Variation of calculated total evaporation from the water surface for a year according to the data of St. Petersburg meteorological station.

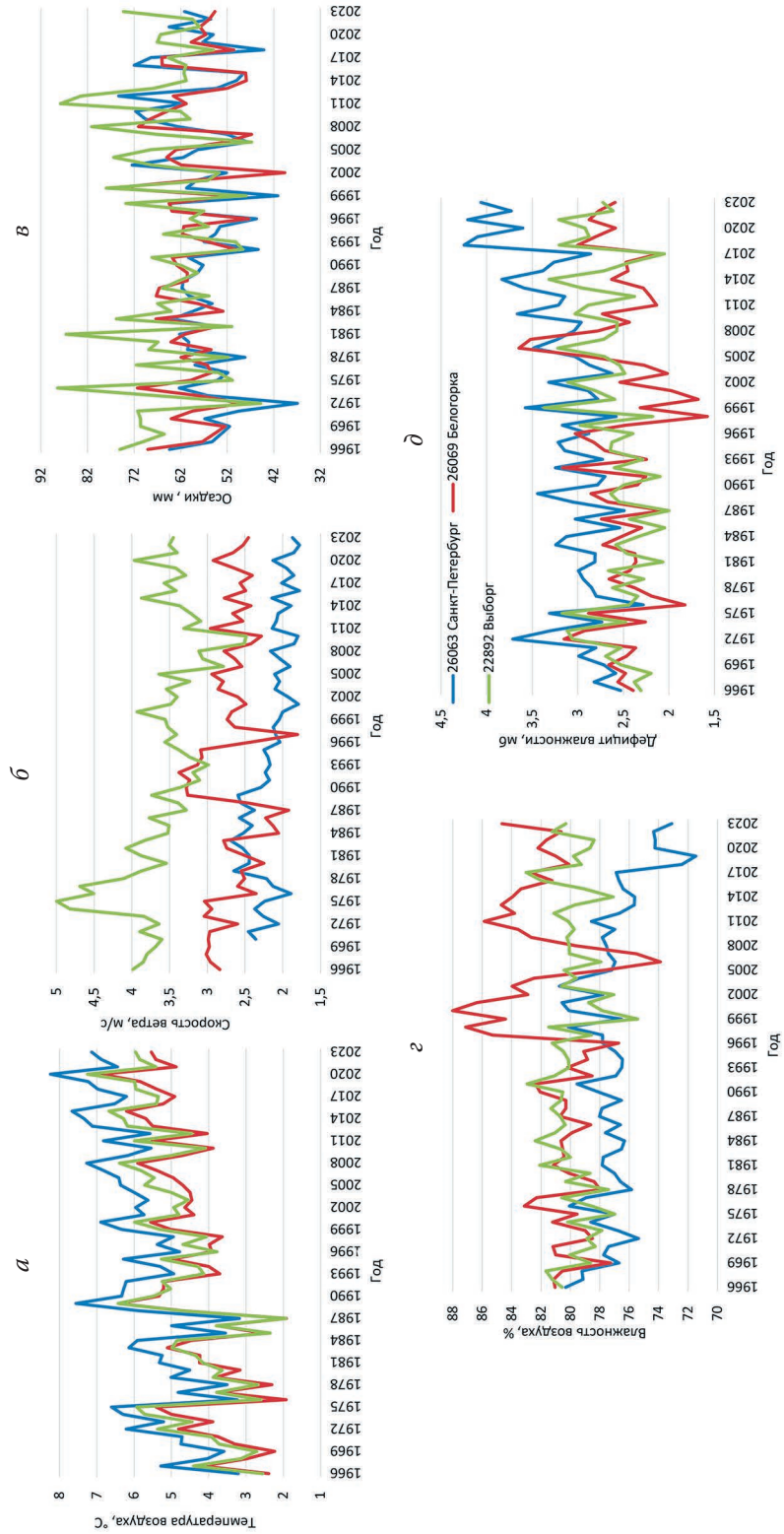


Рис. 4. Изменение метеорологических величин за теплый период года (апрель – октябрь) по данным метеостанций Санкт-Петербург, Белогорка и Выборг, 1966–2023 гг.: *а* – температура воздуха; *б* – скорость ветра; *в* – осадки; *г* – влажность воздуха; *д* – дефицит влажности.

Fig. 4. Change of meteorological values for the warm period of the year (April – October) according to data from meteorological stations of St. Petersburg, Belogorka and Vyborg, 1966–2023: *a* – air temperature; *b* – wind speed; *c* – precipitation; *d* – air humidity; *e* – humidity deficit.

Результаты анализа метеорологических величин, по которым проводятся расчеты (температура воздуха, скорость ветра, атмосферные осадки, относительная влажность и дефицит влажности воздуха), показали, что отклонение Санкт-Петербурга от Выборга и Белогорки наблюдается только по влажности воздуха (рис. 4). Влажность воздуха в Санкт-Петербурге понижается с 2000 г., и причины этого требуют дальнейших исследований. Можно предположить, что после застройки сопредельной с озерами территории здесь также снизилась влажность воздуха, что способствовало росту испарения.

Для оценки водного баланса водоемов, а именно для характеристики водных потерь водоемов и, следовательно, потерь стока, применена характеристика «видимое испарение» – разница между величиной испарения с поверхности воды и осадками за тот же период. Положительная величина видимого испарения свидетельствует о недостаточном увлажнении территории, поскольку в этом случае испарение превышает осадки («сухие» годы). Отрицательным видимое испарение становится, когда величина осадков превышает испарение («влажные» годы). Чем меньше величина видимого испарения, тем более увлажненной становится территория и тем больше влаги может участвовать во влагообороте[9].

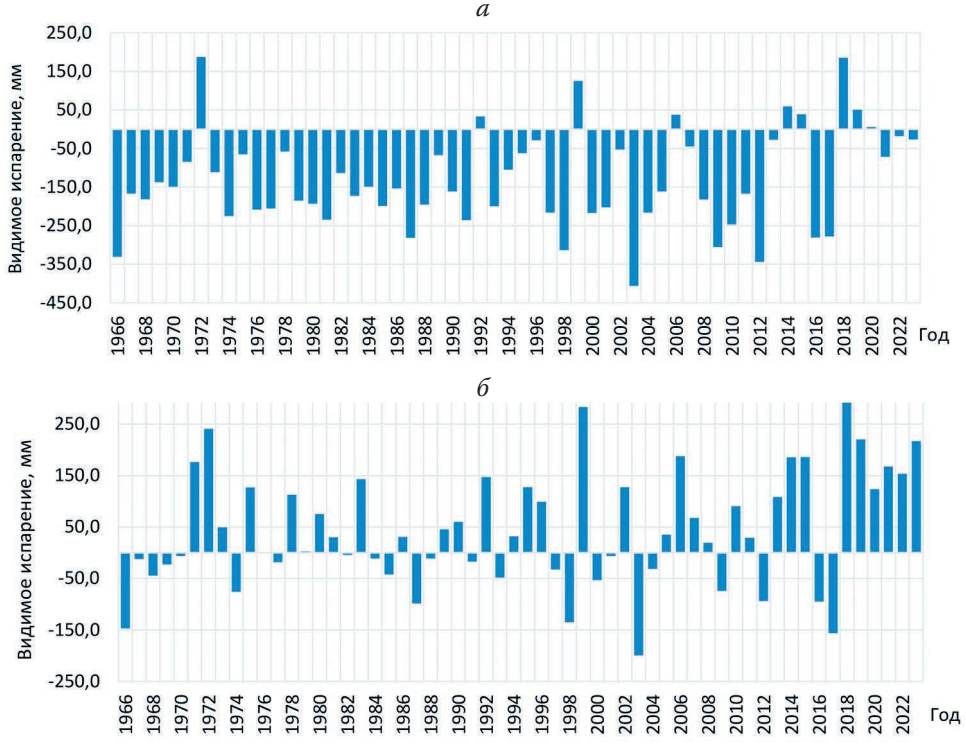


Рис. 5. Видимое испарение для Санкт-Петербурга:
а – за год; *б* – за теплый период (апрель – октябрь).
Fig. 5. Apparent evaporation for St. Petersburg:
a – for a year; *b* – for the warm period (April – October).

Как видно на рис. 5*а*, для Санкт-Петербурга в целом преобладают «влажные» годы. При этом в период активного испарения, в месяцы с положительной температурой (рис. 5*б*), преобладает засушливость, особенно последние годы, когда отмечается рост испарения параллельно с падением влажности (см. рис. 4*г* и 4*д*). По-видимому, наложение значительного увеличения испарения в теплый период на близкое к норме количество осадков (см. рис. 4*в*) отразилось на повышенной «засушливости» последних лет в теплое полугодие.

Приток и сток поверхностных вод

Приток поверхностных вод происходит только в Нижнее Суздальское озеро из р. Старожиловки. А сток из всей озерно-речной системы осуществляется по р. Каменке, вытекающей из Нижнего озера. Гидрологическая изученность этих водотоков непродолжительна. ГГИ выполнял гидрометеорологические исследования озер в 1940-е годы[2] и в 2023–2024 гг.

В 2018–2019 гг. эпизодические гидрологические наблюдения осуществлял СПбГУ на реках Каменке (исток) и Старожиловке (устье – канал). Анализ многолетних данных о стоке рек показал, что существенных количественных изменений в соотношении средних месячных расходов между реками не происходит (рис. 6). Это связано с тем, что вклад стока р. Старожиловки в сток р. Каменки составляет 70–80 %.

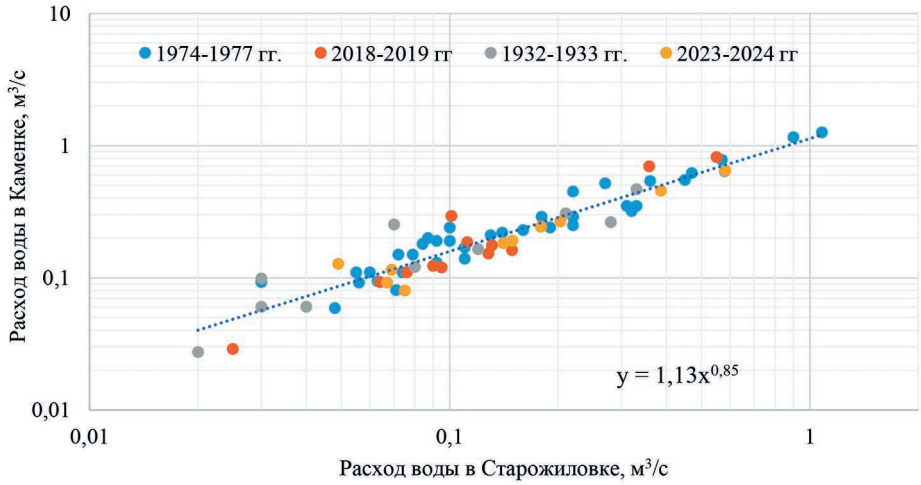


Рис. 6. Связь средних месячных расходов воды в р. Старожиловке и в р. Каменке в истоке из озера в разные периоды наблюдений.
Fig. 6. Relationship of mean monthly water discharge in the Starozhilovka River with the Kamenka River at the source from the lake in different periods of observations.

Сток воды рек в теплый период года определяется количеством выпадающих атмосферных осадков, а в зимний – частыми оттепелями с водоотдачей из снежного покрова. На р. Каменке и в устьевом канале р. Старожиловки ледовые явления зимой практически отсутствуют. Уровенный режим Верхнего

и Среднего озер за период наблюдений 2023–2024 гг. имел небольшую амплитуду изменений, около 25–30 см, а Нижнего – около 60 см. Малая амплитуда колебания уровня воды обусловлена высотными отметками порогов излива из озер. Регулирующее влияние котловины оз. Нижнего на сток р. Каменки проявляется в смещении дат наступления пиков весеннего половодья и дождевых паводков и выравнивании речного стока (рис. 7).

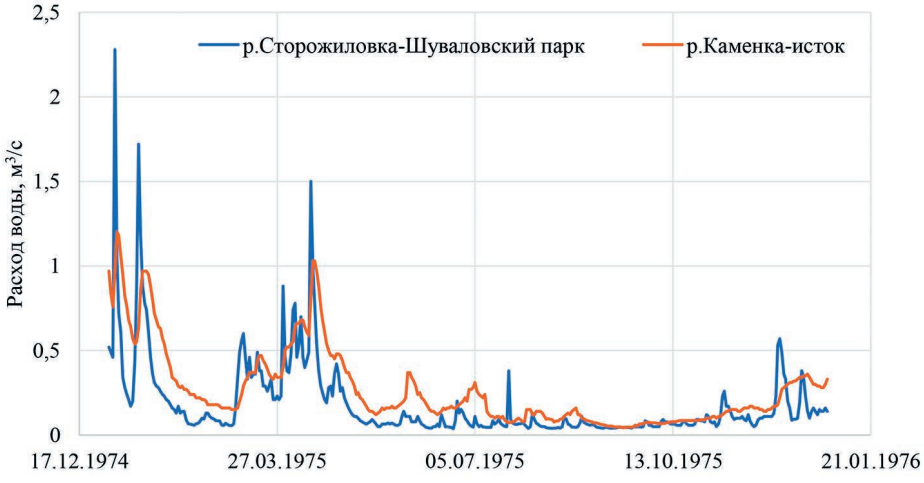


Рис. 7. Ежедневные расходы воды рек за 1974–1975 гг.
Fig. 7. Daily river water discharge for 1974–1975.

Так как ряд наблюдений по рекам озерно-речной системы небольшой, то для определения расходов лет разной водности использован пост на реке-аналоге Охта – д. Девяткино (А = 340 км^2), действующий с 1932 г. по настоящее время. Связь между рекой-аналогом и р. Старожиловкой – Шуваловский парк за два периода наблюдений показана на рис. 8*а*, а связь стока в устье этой реки с постом, расположенным в Шуваловском парке, – на рис. 8*б*. По уравнениям на этих рисунках и рядам наблюдений на р. Охте созданы условные два ряда годового стока в р. Старожиловке. Первый ряд условно-естественный, восстановлен по данным наблюдений на р. Старожиловке в 1970-е годы. Второй ряд восстановлен для условий существующей застройки водосбора по данным наблюдений в 2023–2024 гг. В обоих случаях принято допущение, что антропогенные условия формирования водного режима оставались неизменными и характерными для уровня застройки водосбора каждого периода. Это допущение дает возможность рассчитать возможное различие водного баланса озер для лет разной водности из-за метеорологических условий. Параметры кривых обеспеченностей для каждого условного ряда приведены в табл. 2.

Сток между озерами существенно зависит от состояния водопропускных сооружений, которые периодически забиваются мусором, а зимой – ледовыми образованиями. Так как изученность стока между озерами чрезвычайно мала, в т. ч. из-за перестройки водопропускных сооружений на протяжении

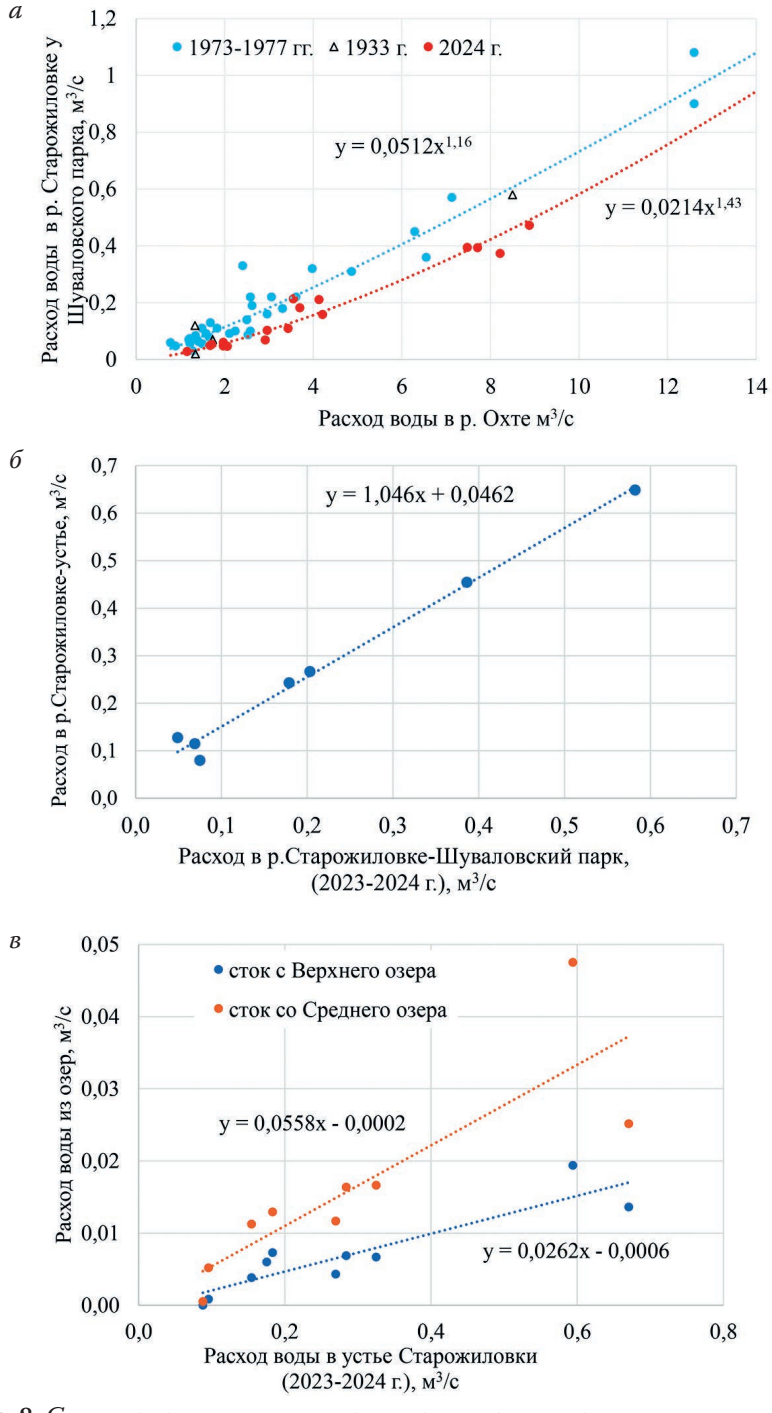


Рис. 8. Связь средних месячных расходов воды в водотоках за совместные периоды наблюдений в 1933 г., 1973–1977 гг. и 2023–2024 гг.
Fig. 8. Relationship of mean monthly water discharge in streams for the combined observation periods 1933, 1973–1977 and 2023–2024.

почти 150 лет, для расчетов водного баланса озер в годы различной водности использована связь их стока с р. Старожиловкой по данным наблюдений в 2023–2024 гг. (рис. 8*в*). Генетически эта связь обусловлена одинаковыми природными условиями формирования водного режима, включая подземное питание.

Таблица 2. Статистические параметры кривой распределения вероятности рядов среднего годового стока р. Старожиловка – парк Шуваловский, восстановленных по реке-аналогу Охта – д. Девяткино по данным кратковременных наблюдений за два периода

Table 2. Statistical parameters of the probability distribution curve of the series of mean annual runoff of the Starozhilovka River – Shuvalovsky Park, reconstructed from the analog river Okhta – village Devyatkino based on short-term observations for two periods

Тип кривой	Продолжительность наблюдений, лет	Среднее, $м^3/с$	Cv	Cs
по данным наблюдений 1973–1977 гг.				
Пирсона III	87	0,242	0,30	1
по данным наблюдений 2023–2024 гг.				
Пирсона III	87	0,182	0,33	2,5

Результаты расчетов годового стока в водотоках в годы различной водности для двух антропогенных условий формирования стока на водосборах, характерных для 1970-х годов и современного периода, приведены в табл. 3.

В расчетах водного баланса не учитывается переходящий объем воды в озерах от года к году, поэтому принято допущение, что водный режим в озерах имеет только сезонное регулирование из-за малой амплитуды колебания уровня воды. Неувязка в водном балансе, определенная как разница между приходной и расходной составляющими, отнесена к подземному питанию озер. Результаты расчетов показывают, что основное питание Верхнего Суздальского озера составляют подземные воды – около 60–80 % (табл. 4). В Среднем Суздальском озере, меньшем по размерам и глубине, подземное питание сопоставимо с поверхностным притоком, а в Нижнем составляет только четверть от всего прихода воды. За прошедшие пятьдесят лет доля атмосферных осадков в питании озер выросла из-за снижения питания поверхностными водами.

Внешний водообмен в озерах определяет условия обновления воды. В табл. 5 показано, что самое быстрое условное водообновление происходит в Нижнем Суздальском озере (2–3 месяца), а в Верхнем оно составляло раньше 4 года. В настоящее время период условного водообновления вырос на всех озерах в 1,3–1,5 раза.

Следствием снижения водообмена является понижение в озерах уровня воды, больший прогрев в теплый период, рост испарения, уменьшение самоочищающей способности водоемов. Поэтому, а также из-за поступления за-

Таблица 3. Составляющие водного баланса на гидросистеме Суздальских озер
Table 3. Components of water balance in the Suzdal Lakes hydrosystem

Водоем	Многоводный (25 %)	Средний (50 %)	Маловодный (75 %)
Атмосферные осадки, тыс. м³/год			
Верхнее озеро	186	168	140
Среднее озеро	127	115	96
Нижнее озеро	819	742	618
Испарение, тыс. м³/год			
Верхнее озеро	111	118	121
Среднее озеро	72	76	78
Нижнее озеро	524	559	571
Сток, тыс. м³/год			
Р. Старожиловка – канал (устье)	10 885 / 7 158*	9 113 / 5 740	7 307 / 4 519
Р. Каменка – исток	14 093 / 9 789	11 947 / 8 162	9 995 / 6 764
Сток из Верхнего в Среднее озеро	266 / 169	220 / 132	173 / 101
Сток из Среднего в Нижнее озеро	601 / 393	502 / 313	401 / 245
Разница между приходной и расходной составляющей, тыс. м³/год			
Верхнее озеро	–191 / –94	–170 / –82	–154 / –82
Среднее озеро	–280 / –169	–244 / –142	–211 / –127
Нижнее озеро	–2 312 /–1 940	–2 148 / –1 925	–2 240 / –1 953
Разница между приходной и расходной составляющими водного баланса, л/с			
Верхнее озеро	–6 / –3	–5 / –3	–5 / –3
Среднее озеро	–9 / –5	–8 / –5	–7 / –4
Нижнее озеро	–73 / –62	–68 / –61	–71 / –62

Примечание: * – в числителе – для антропогенных условий формирования стока, характерных для 1970-х годов; в знаменателе – для 2023–2024 гг.

грязнений с урбанизированных территорий, в Нижнем Суздальском озере в летний период происходит цветение воды и зарастание, особенно в северной мелководной части. Она уже сейчас становится основным «поставщиком» начального цветения воды в озере (рис. 9). Верхнее и Среднее Суздальские озера менее подвержены цветению, т. к. в них меньше поступают загрязненные поверхностные воды и большая доля в их питании источников подземных вод.

Таблица 4. Вклад основных источников в питание озер в средний по водности год, %
Table 4. Contribution of main sources to lake feeding in average water availability year, %

Озеро	Осадки минус испарение	Приток вод		Сумма
		поверхностных	подземных	
Верхнее	23/38*	0/0	77/62	100
Среднее	8/13	44/42	48/45	100
Нижнее	2/2	80/74	18/24	100

Примечание: * – в числителе – для антропогенных условий формирования стока, характерных для 1970-х годов; в знаменателе – для 2023–2024 гг.

Таблица 5. Период условного водообмена в озерах, месяц
Table 5. Period of conditional water exchange in lakes, month

Водоем	Объем, млн м^3	Многоводный (25 %)	Средний (50 %)	Маловодный (75 %)
Оз. Верхнее Суздальское	1,2	38/51*	43/58	49/65
Оз. Среднее Суздальское	0,65	12/17	13/20	16/24
Оз. Нижнее Суздальское	2,95	2/3	3/4	3/5

Примечание: * – в числителе – для антропогенных условий формирования стока, характерных для 70-х годов; в знаменателе – для 2023–2024 гг.



Рис. 9. Северная часть Нижнего Суздальского озера.
Fig. 9. Northern part of the Lower Suzdal Lake.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Масштабная застройка водосбора Суздальских озер в последние 50 лет привела к уменьшению их питания на 30–40 %. Выполненные гидрологические исследования и воднобалансовые расчеты показывают, что произошло существенное уменьшение водообмена в озерах. В результате этого, а также из-за увеличения испарения с воды летом в Санкт-Петербурге в последние десятилетия на 100–150 мм, происходит снижение самоочищающей способности озер, ухудшение их экологического состояния, несмотря на заметный рост атмосферных осадков. И если постепенно удастся снизить поступление загрязнений с водосборной площади, то водообмен в озерах невозможно восстановить даже к его состоянию в последней четверти XX в. Поэтому необходимы радикальные меры для оздоровления озер, включающие не только изъятие накопившихся загрязнений в донных отложениях, но, возможно, и регулирование стока из них, и засыпку мелководной зарастающей северной части Нижнего Суздальского озера.

Полученные результаты основаны на весьма ограниченном объеме гидрометеорологических данных и не могут претендовать на высокую точность оценок. Необходимы дальнейшие исследования с постановкой комплексных наблюдений за формированием водного режима озер. Результаты таких наблюдений могут быть полезны для оценки допустимого воздействия на другие водные объекты северной части Санкт-Петербурга при расширении городской застройки, в т. ч. и для развития гидрологии урбанизированных территорий.

Следует отметить, что сложившаяся гидрологическая ситуация является типичной для антропогенных ландшафтов. Можно констатировать, что этому научному направлению в России до сих пор уделяется значительно меньше внимания по сравнению с оценками климатообусловленных изменений в гидрологическом режиме водных объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данные среднемесячной температуры воздуха на станциях России / под ред. О.Н. Булыгиной, В.Н. Разуваева, Л.Т. Трофименко, Н.В. Швец. [Электронный ресурс]. URL: http://meteo.ru/data.
2. Массив данных месячных сумм осадков на станциях России / под ред. О.Н. Булыгиной, В.Н. Разуваева, Н.Н. Коршуновой, Н.В. Швец. [Электронный ресурс]. URL: http://meteo.ru/data.
3. Месячные суммы осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов / под ред. Б.М. Ильина, О.Н. Булыгиной, Э.Г. Богдановой, В.М. Веселова, С.Ю. Гавриловой. [Электронный ресурс]. URL: http://meteo.ru/data.
4. Массив срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России / под ред. О.Н. Булыгиной, В.М. Веселова, В.Н. Разуваева, Т.М. Александровой [Электронный ресурс]. URL: http://meteo.ru/data.
5. Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.

6. Давыдов В.К. Испарения с водной поверхности в Европейской части СССР // Труды НИУ ГУГМС. 1944. Сер. IV. Вып. 12. 120 с.
7. Сперанская Н.А. Потенциально возможное и видимое испарение и его изменения на Европейской части России за последние 50 лет (по экспериментальным данным) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 6. С. 661–672.
8. Александрова Е.Л. Северные окрестности Петербурга. Историческое прошлое. Научно-популярное издание. СПб.: Лики России. 2008. С. 362–364.
9. Рукавишников Д.А. и др. Парголовская мыза на планах XVIII века: от крестьянской пашни до Шуваловского парка. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 243. С. 136–161.
10. Гидрометеорологический режим и водный баланс верховых болот Северо-Запада России (на примере болота Ламмин-Суо) / Под ред. С.М. Новикова, В.И. Батуева. СПб: Свое издательство, 2019. 448 с.
11. Марков М.Л., Гуревич Е.В., Журавин С.А., Батуев В.И., Калюжный И.Л., Лавров С.А. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях. Научно-прикладной справочник / Под ред. М.Л. Маркова. СПб.: ООО «РИАЛ», 2021. 202 с.

REFERENCES

1. Data of mean monthly air temperature at the stations of Russia / under the ed. O.N. Bulygina, V.N. Razuvaev, L.T. Trofimenko, N.V. Shvets. (In Russ.). [Electronic resource]. URL: http://meteo.ru/data.
2. Data array of monthly precipitation totals at the stations of Russia / edited by O.N. Bulygina, V.N. Razuvaev, N.N. Korshunova, N.V. Shvets. (In Russ.). [Electronic resource]. URL: http://meteo.ru/data.
3. Monthly sums of precipitation with elimination of systematic errors of precipitation gauges. Precipitation gauges / edited by B.M. Ilyin, O.N. Bulygina, E.G. Bogdanova, V.M. Veselov, S.Yu. Gavrilova. (In Russ.). [Electronic resource]. URL: http://meteo.ru/data.
4. Array of urgent data on the main meteorological parameters at the stations of Russia / edited by O.N. Bulygina, V.M. Veselov, V.N. Razuvaev, T.M. Aleksandrova. (In Russ.). [Electronic resource]. URL: http://meteo.ru/data.
5. Ivanov H.H. About determination of evaporability values. *Izvestiya of the All-Union Geographical Society.* 1954. T. 86. No 2. P. 189–196. (In Russ.).
6. Davydov V. K. Evaporation from the water surface in the European part of the USSR. *Proceedings of the Research Institute of State Hydrometeorology and Geophysics.* 1944. Ser. IV. Iss. 12. 120 p. (In Russ.).
7. Speranskaya N.A. Potential and visible evaporation and its changes in the European part of Russia over the last 50 years (based on experimental data). *Water Resources.* 2016. Vol. 43. No. 6. P. 661–672.
8. Aleksandrova E.L. Northern neighborhoods of St. Petersburg. Historical past. Popular science edition. Saint Petersburg: Liki Rossii, 2008. P. 362–364.
9. Rukavishnikov D.A. et al. Pargolovskaya manor on the plans of the XVIII century: from peasant's arable land to Shuvalovsky park. *Izvestiya of St. Petersburg Forestry Academy.* 2023. Iss. 243. P. 136–161.
10. Hydrometeorological regime and water balance of upland bogs of the North-West of Russia (on the example of the Lammin-Suo bog) / Edited by S.M. Novikov, V.I. Batuev. Saint Petersburg: Svoye publishing house, 2019. 448 p.
11. Markov M.L., Gurevich E.V., Zhuravin S.A., Batuev V.I., Kalyuzhny I.L., Lavrov S.A. Multiyear changes of water balance elements at water-balance and bog stations. Scientific-applied reference book / Edited by M.L. Markov. Saint Petersburg: OOO «RIAL», 2021. 202 p.

Сведения об авторах:

Марков Михаил Леонидович, канд. геогр. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальной гидрологии, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Россия, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23; ORCID: 0000-0002-6118-2704; e-mail: 2014mml@gmail.com

Гуревич Елена Витальевна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, отдел прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальной гидрологии, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Россия, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23; ORCID: 0000-0003-0739-4244; e-mail: gewita@yandex.ru

Иванова Светлана Александровна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, отдел прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальной гидрологии, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Россия, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23; ORCID: 0009-0008-4214-1684; e-mail: s.ivanova@hydrology.ru

About the authors:

Mikhail L. Markov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Head of the Department of Hydrological Processes Forecasting and Experimental Hydrology, State Hydrological Institute, V.O. Second Line, 23, St. Petersburg, 199053, Russia; ORCID: 0000-0002-6118-2704; e-mail: 2014mml@gmail.com

Elena V. Gurevich, Candidate of Geographical Sciences; Senior Researcher, Hydrological Processes Forecasting and Experimental Hydrology Department, State Hydrological Institute, V.O. Second Line, 23, St. Petersburg, 199053, Russia; ORCID: 0000-0003-0739-4244; e-mail: gewita@yandex.ru

Svetlana A. Ivanova, Candidate of Geographical Sciences; Senior Researcher, Hydrological Processes Forecasting and Experimental Hydrology Department, State Hydrological Institute, V.O. Second Line, 23, St. Petersburg, 199053, Russia; ORCID: ORCID: 0009-0008-4214-1684; e-mail: s.ivanova@hydrology.ru

Поступила в редакцию / Received 31.05.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 25.06.2025.
Принята к публикации / Accepted 10.07.2025.

УДК 556.6 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-94-110*

Эколого-геохимическая оценка состояния реки Уруп в зоне действия Урупского ГОК

И.В. Бегдай ✉, Е.Г. Мишвелов, К.В. Харин, К.Ю. Шкарлет

✉ algae@mail.ru

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Статья посвящена комплексной эколого-геохимической оценке состояния р. Уруп в зоне влияния отработанного хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината (ГОК). Актуальность исследования обусловлена долгосрочным негативным воздействием хвостохранилища на водную экосистему, что проявляется в накоплении тяжелых металлов в воде и донных отложениях, а также в ухудшении качества воды, используемой для водоснабжения и рыбохозяйственной деятельности. **Методы.** Выполнены полевые работы по отбору проб воды и донных отложений на шести участках реки, а также лабораторные анализы с использованием атомно-абсорбционной спектрометрии для определения концентраций тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Co, Fe, Mn). Для оценки загрязнения применялись индекс загрязненности воды (ИЗВ), коэффициент концентрации (Кс), коэффициент донной аккумуляции (КДА) и суммарный показатель загрязнения (Zc). **Результаты.** Установлено значительное превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) тяжелых металлов в воде, особенно для Pb (до 119,7 × ПДК), Zn (до 158 × ПДК) и Cu (до 43,5 × ПДК). Класс качества воды варьировал от VII («чрезвычайно грязная») вблизи хвостохранилища до V («грязная») на удаленных участках. Донные отложения характеризовались высоким уровнем аккумуляции Fe, Mn и Zn, что свидетельствует о хроническом загрязнении. Выводы исследования подчеркивают необходимость постоянного мониторинга и внедрения мер по снижению техногенной нагрузки, включая реабилитацию территории хвостохранилища.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка состояния р. Уруп, индекс загрязненности воды, суммарный показатель загрязнения донных отложений.

Для цитирования: Бегдай И.В., Мишвелов Е.Г., Харин К.В., Шкарет К.Ю. Эколого-геохимическая оценка состояния реки Уруп в зоне действия Урупского ГОК // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 94–110. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-94-110; EDN: EDCYVU

Ecological and geochemical assessment of the state of the Urup River in the area of the Urupsky Mining and Processing Plant

Inna V. Begday ✉, Evgeny G. Mishvelov, Konstantin V. Kharin, Konstantin Yu. Shkarlet

✉ algae@mail.ru

North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

© Бегдай И.В., Мишвелов Е.Г., Харин К.В., Шкарлет К.Ю., 2025

ABSTRACT

Relevance. The article is devoted to a comprehensive ecological and geochemical assessment of the Urup River condition in the zone of influence of the spent tailings pond of the Urup Mining and Processing Plant (MPP). The relevance of the study is due to the long-term negative impact of the tailings pond on the aquatic ecosystem, which is manifested in the accumulation of heavy metals in water and bottom sediments, as well as in the deterioration of the quality of water used for water supply and fisheries. **Methods.** The research methods included field work on collecting samples of water and bottom sediments at six sections of the river, as well as laboratory analyzes using atomic absorption spectrometry to determine the concentrations of heavy metals (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Co, Fe, Mn). To assess the pollution, the water pollution index (WPI), concentration coefficient (Kc), bottom accumulation coefficient (BAC) and total pollution index (Zc) were used. **Results.** The results showed significant excess of maximum permissible concentrations (MPC) of heavy metals in water, especially for Pb (up to 119.7 × MPC), Zn (up to 158 × MPC) and Cu (up to 43.5 × MPC). Water quality class varied from VII («extremely dirty») near the tailings storage facility to V («dirty») in remote areas. Bottom sediments were characterized by high levels of Fe, Mn and Zn accumulation, indicating chronic pollution. The findings of the study highlight the need for ongoing monitoring and implementation of measures to reduce anthropogenic load, including rehabilitation of the tailings storage facility.

KEYWORDS: assessment of the Urup River condition, water pollution index, total pollution index of bottom sediments.

For citation: Begday I.V., Mishvelov E.G., Kharin K.V., Shkarlet K.Yu. Ecological and geochemical assessment of the state of the Urup River in the area of the Urupsky Mining and Processing Plant. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 4. P. 94–110. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-94-110; EDN: EDCYVU.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение водных объектов, особенно рек, в результате деятельности горно-обогатительных комбинатов (ГОКов) остается одной из самых острых экологических проблем современности. Хвостохранилища, предназначенные для складирования отходов обогащения полезных ископаемых, содержат широкий спектр токсичных веществ, включая тяжелые металлы, реагенты флотации, цианиды и другие соединения, способные оказывать негативное влияние на окружающую среду при нарушении целостности гидротехнических сооружений или при фильтрации загрязненных вод в подземные горизонты и поверхностные водотоки [1]. Загрязнение водных объектов, в свою очередь, приводит к деградации экосистем, снижению биоразнообразия, ухудшению качества питьевой воды и возникновению угроз для здоровья населения, проживающего в прилегающих районах [2, 3].

Особую актуальность приобретает оценка влияния объектов, введенных в эксплуатацию в прошлые десятилетия, таких как первая очередь отработанного хвостохранилища Урупского ГОКа, на современные экологические условия. Долгосрочное воздействие подобных объектов может проявляться в аккумуляции загрязняющих веществ в донных отложениях, изменении гидрохимического режима и деградации водных биоценозов [4].

Урупский ГОК, расположенный в Карачаево-Черкесской Республике, является ведущим предприятием горнодобывающей промышленности региона.

Несмотря на принимаемые меры, хвостохранилища, представляющие собой сложные гидротехнические сооружения, потенциально несут серьезную угрозу для окружающей среды, особенно для наиболее уязвимых к антропогенному воздействию водных экосистем [5]. Однако отработанное хвостохранилище, функционировавшее на протяжении значительного периода, представляет собой потенциальную угрозу для р. Уруп, являющейся ценным водным ресурсом и местом обитания многих видов флоры и фауны. Даже после прекращения эксплуатации I очереди хвостохранилища процессы выщелачивания и миграции загрязняющих веществ продолжаются, оказывая негативное воздействие на качество воды и состояние речной экосистемы [6].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью проведения комплексной оценки современного экологического состояния р. Уруп в зоне влияния первой очереди отработанного хвостохранилища Урупского ГОКа. При этом анализировались основные источники и механизмы загрязнения, оценивались масштабы и характер воздействия на водную экосистему. Отсутствие исчерпывающих данных о современном состоянии реки в контексте долгосрочного воздействия отработанного хвостохранилища потребовало проведения детального анализа и комплексных исследований, опирающихся на современные методы и подходы в области экологии и геохимии.

Целью данного исследования являлась оценка современного влияния I очереди отработанного хвостохранилища Урупского ГОКа на состояние р. Уруп. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– осуществить полевые исследования для отбора проб воды, донных отложений в различных точках р. Уруп, включая контрольные участки, расположенные выше и ниже зоны влияния хвостохранилища;

– выполнить комплексный анализ отобранных проб, включающий определение физико-химических показателей воды (pH, электропроводности, минерализации, содержания растворенного кислорода), концентраций тяжелых металлов (меди, цинка, свинца, кадмия, железа, марганца и др.);

– оценить состояние донных отложений путем определения тяжелых металлов и расчета суммарного показателя загрязнения (Zc).

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – р. Уруп, расположенная в зоне воздействия законсервированной I очереди хвостохранилища Урупского ГОКа, где перерабатываются медно-колчеданные руды Урупского месторождения (Карачаево-Черкесия) (рис. 1, 3). Пробы воды и донных отложений отбирали в 2022–2023 гг. на шести участках вдоль течения реки. Гидрохимический анализ выполняли по усредненным данным. Расположение контрольных точек отбора проб отражено на рис. 1.

Пробы воды отбирали в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб» в пластиковые бутылки объемом 1 л с глубины 5–15 см и консервировали концентрированной азотной кислотой до pH 2 для

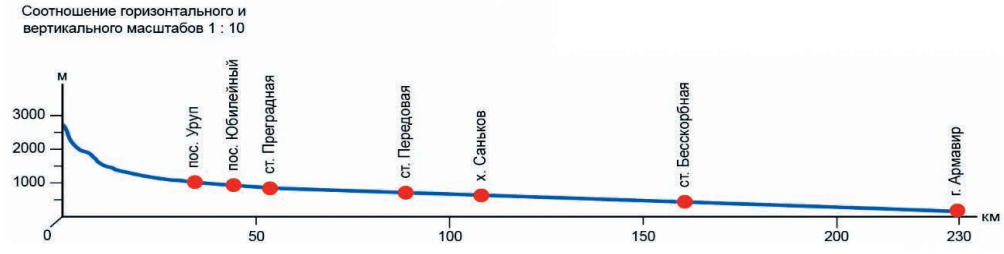


Рис. 1. Продольный профиль р. Уруп с точками отбора проб воды и донных отложений.
Fig. 1. Longitudinal profile of the Urup River with sampling points for water and bottom sediments.

последующего определения микроэлементов. Пробы донных отложений отбирали в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность» в русле реки в контейнеры объемом 200 см^3. Просеянные пробы отквартовывали и упаковывали в пакеты из крафт-бумаги.

Пробы природной воды были профильтрованы через обеззоленный фильтр «Синяя лента». Пробы донных отложений высушены в сушильном шкафу ШС-80-01Н СПУ и просеивались через сито с диаметром отверстий 1 мм.

Определение водородного показателя проб воды проводили на иономере pH МЕТР pH-150МИ. Для определения удельной электропроводности, а также минерализации в пересчете на хлорид натрия, хлорид калия и гидроксид натрия использовали кондуктометр «Эксперт-002», для определения растворенного кислорода – термооксиметр «Эксперт-001».

Исследования проводились на базе научно-учебной лаборатории биогеохимии окружающей среды Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ). Анализ проб природной воды и донных отложений на предмет содержания в них валовых форм металлов – Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Co, Fe, Mn – произведен методом атомно-абсорбционной спектрометрии на атомно-абсорбционном спектрометре с атомизацией в пламени iCE 3300 (Thermo Scientific, США) (поверен Ставропольским центром стандартизации и метрологии), калибровочные графики выстроены с помощью государственных стандартных образцов с аттестованными значениями определяемых катионов, разведенных в 1М растворе азотной кислоты. Для определения валовых форм металлов применялась ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.36-02 «Методика выполнения измерений валового содержания меди, кадмия, цинка, свинца, никеля, марганца, кадмия и хрома в почвах, донных отложениях, осадках сточных вод и отходах методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии» (издание 2011 г.).

В работе приведены и использованы для расчета интегральных показателей средние значения концентрации тяжелых металлов. Все исследования проведены в трехкратной повторности, коэффициент корреляции градуировочного графика каждого из анализов составил r = 0,999. Для каждого из по-

лученных значений проведен контроль точности результата по показателю стандартной относительной неопределенности в соответствии с требованиями внутрилабораторного контроля, действующими на территории Российской Федерации.

Для оценки качества воды концентрацию элементов в р. Уруп сравнивали с нормами СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». В связи с отсутствием нормативных документов оценку загрязненности донных отложений проводили по данным для почв [7].

Для количественной характеристики загрязнения компонентов окружающей среды вычисляли: коэффициент концентрации (Кс), характеризующий степень накопления химических элементов в донных отложениях и водах по отношению к нормативным показателям; индекс загрязненности воды (ИЗВ) по методике РД 52.24.643-2002[1] с использованием нормативов; суммарный показатель загрязнения (Zc) по методике Ю.Е. Саета [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Существует два основных пути переноса вредных веществ из хвостохранилища – ветровой, связанный с чрезвычайно мелким гранулометрическим составом складируемого материала, и водный, обусловленный взаимодействием атмосферных осадков и отходов обогащения, что приводит к локальному загрязнению близлежащих водоемов и рек токсичными элементами [9].

Урупское медно-колчеданное месторождение находится в верхнем течении р. Уруп на территории Урупского района Карачаево-Черкесской Республики, в 20 км к югу от районного центра, станицы Преградной.

Как следует из исследований Е.В. Алампиевой, а также из анализа фондовых материалов [10, 11], главными рудообразующими минералами являются: пирит (FeS_2), халькопирит ($CuFeS_2$), сфалерит (ZnS), борнит (Cu_5FeS_4), молибденит (MoS_2); второстепенные рудные минералы – ковеллин (CuS), пирротин (FeS), арсенопирит Fe(AsS), малахит $Cu_2CO_3(OH)_2$, блеклые руды (теннантит Cu_3AsS_3, тетраэдрит Cu_3SbS_3), галенит (PbS), гематит (Fe_2O_3), станин ($Cu_2FeSn\ S_4$), халькозин (Cu_2S), беегерит (Pb_6Bi2S_9). Содержащиеся в месторождении сидерофильные и халькофильные химические элементы относятся к 1–3-й группам токсичности (Pb, Cd, Co, Zn, Cu, Ni, Mn и др.). Извлеченные из месторождений в хвостохранилища элементы накапливаются в окружающем ландшафте, изменяя состояние среды жизнедеятельности и создавая потенциальную опасность.

В результате проведенных исследований установлено, что вода р. Уруп пресная, с изменяющимся кислотно-щелочным балансом от нейтральной (pH ≈ 7,7) до слабощелочной (pH ≈ 8,27) среды. Физико-химические показатели воды р. Уруп демонстрируют рост минерализации (от 0,004 % до 0,027 % NaOH) и электропроводности (УЭП от 132,8 до 896,8 мкСм/см) вниз по те-

[1] РД 52.24.643-2002 Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям / Росгидромет. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003 г.

чению, что связано с комбинированным влиянием хвостохранилища. Наибольшие изменения отмечены у ст. Бесскорбная (УЭП = 896,8 мкСм/см), что свидетельствует о значительном техногенном влиянии в этом районе. Растворенный кислород (O_2) колеблется в пределах 4,55–10,29 мг/л, что соответствует норме для поверхностных вод, но снижение у ст. Преградная (4,55 мг/л) может указывать на локальное загрязнение (табл. 1).

Таблица 1. Качество воды в створах р. Уруп
Table 1. Water quality in the Urup River ranges

Точка отбора проб	Координаты	Показатель						
		Т, °С	УЭП, мкСм/см	Минерализация			Раств. O_2, мг/л	pH
				NaOH, %	NaCl, мг/л	KCl, мг/л		
Уруп (пос. Уруп)	N 43:50:54,6 E 41:09:14,4	6,1	132,8	0,004	100,7	107,3	5,23	7,7
Уруп (пос. Юбилейный)	N 43:54:27,7 E 41:08:26,0	6,1	139,7	0,005	106,5	113,5	5,56	7,79
Уруп (ст. Преградная)	N 43:57:35,7 E 41:12:14,3	7,7	172,1	0,006	125,5	133,7	4,55	7,89
Уруп (ст. Передовая)	N 44:07:47,2 E 41:27:18,8	11,1	347,1	0,01	243,3	249,7	10,2	8,10
Уруп (ст. Удобная – х. Саньков)	N 44:15:24,3 E 41:34:24,6	11,3	430,1	0,013	290,3	309,5	9,8	8,19
Уруп (ст. Бесскорбная)	N 44:38:20 E 41: 19:23,9	11,0	896,8	0,027	620,2	659,9	10,29	8,27

По результатам анализа микроэлементного состава (табл. 2) установлено высокое содержание элементов в воде реки. Превышение ПДК зафиксировано для всех исследуемых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Co, Fe, Mn), особенно вблизи хвостохранилища. Однако повышенные концентрации Mn, Cu, Fe и других элементов могут быть из-за того, что породы в районе исследования имеют в своем составе их высокое содержание.

Уруп — не только главный источник водоснабжения Урупского района, река важна и в рыбохозяйственном плане. При сравнении содержания тяжелых металлов в воде р. Уруп с нормативами качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения установлено, что с удалением от хвостохранилища концентрация исследуемых химических элементов снижается значительно, но неравномерно. Отмечается большое превышение

концентраций следующих металлов: Zn – превышение в 8–158 раз (максимум у пос. Уруп – 0,608 мг/л при ПДК 0,01 мг/л), Pb – превышение ПДК в 44,7–119,7 раза (максимум у пос. Юбилейный – 0,71825 мг/л при ПДК 0,006 мг/л), Cu – превышение ПДК в 5–43,5 раза (максимум у пос. Уруп – 0,0435 мг/л при ПДК 0,001 мг/л). Также отмечаются превышения Cd – в 1,1–14,5 раза, Fe – в 7,3–10,5 раза, Mn – в 5,6–12,2 раза.

Результаты анализа микроэлементного состава выявили значительное превышение ПДК для тяжелых металлов, особенно Pb (до 119,7 × ПДК), Zn (до 158 × ПДК) и Cu (до 43,5 × ПДК). Пространственное распределение показывает формирование техногенной аномалии в районе хвостохранилища, где концентрации металлов максимальны, а их снижение вниз по течению происходит неравномерно, что, возможно, обусловлено геохимическими барьерами и процессами сорбции.

Для оценки влияния рассматриваемого антропогенного источника на качество поверхностных вод р. Уруп применен индекс загрязненности воды (ИЗВ). Данный показатель позволяет количественно оценить степень загрязнения водной среды и провести сравнительный пространственный анализ ее состояния – от створа к створу, от пункта к пункту (рис. 2).

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов в воде р. Уруп, мг/л
Table 2. Content of heavy metals in the Urup River, mg/l

Точка отбора проб	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Co	Fe	Mn
Уруп (пос. Уруп)	0,608	0,0435	н/о	0,008	0,008	0,021	0,9147	0,079
Уруп (пос. Юбилейный)	0,7555	0,0255	0,71825	0,013	0,0093	0,0232	0,8357	0,087
Уруп (ст. Преградная)	0,3965	0,0245	н/о	0,0725	н/о	0,0182	1,0655	0,0772
Уруп (ст. Передовая)	0,15875	0,0005	0,26975	0,0055	0,00148	0,01675	0,7292	0,1222
Уруп (ст. Удобная – х. Саньков)	0,0825	н/о	н/о	0,065	н/о	0,01175	0,8207	0,0567
Уруп (ст. Бесскорбная)	0,30675	н/о	н/о	0,0095	н/о	0,1025	0,7637	0,1182
ПДК[2]	**0,01**	**0,001**	**0,006**	**0,005**	**0,01**	**0,01**	**0,1**	**0,01**
Токсичность[3]	**3**	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**3**	**3**

[2] Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».
[3] СанПиН 2.1.3684-21. Гигиенические нормативы содержания загрязняющих веществ. М., 2021.

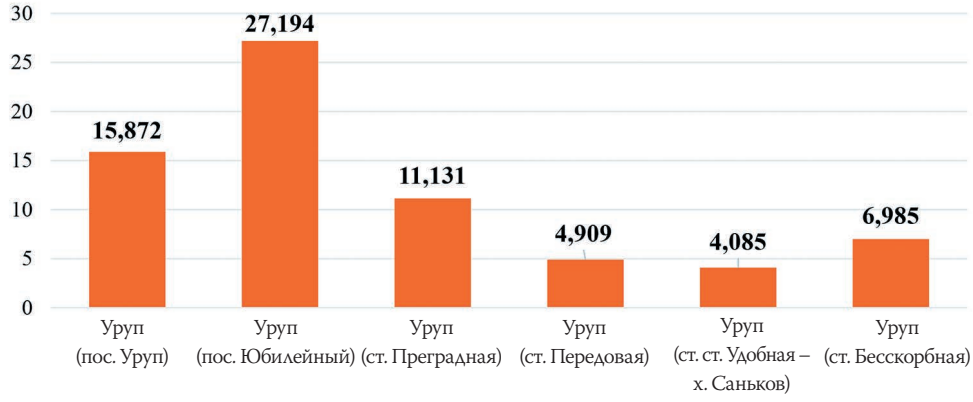


Рис. 2. Результаты ИЗВ р. Уруп в исследуемых створах.
Fig. 2. Results of the water quality survey of the Urup River in the studied sections.

Данные расчета ИЗВ по створам показали, что класс качества воды изменяется от VII «чрезвычайно грязная» (створы пос. Уруп, Юбилейный и ст. Преградная), что обусловливается влиянием стоков с хвостохранилища, до V «грязная» (ст. Передовая и ст. Удобная – х. Саньков). В створах 4–6 значения ИЗВ изменяются в 2,5 раза – с VI класса «очень грязная» (ст. Бесскорбная) до V. Небольшое увеличение значение ИЗВ в створе 6 ст. Бесскорбная обусловлено влиянием сброса неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод жилищно-коммунального хозяйства. На рис. 3 представлено распределение загрязнения воды в р. Уруп, которое наглядно иллюстрирует влияние стоков Урупского ГОКа как источника антропогенного воздействия.

Значимым аспектом изучения экологического состояния водных объектов и одним из важнейших факторов, определяющих их экологический статус, являются исследования донных отложений, наиболее адекватно отражающие их современное состояние и содержащие информацию о загрязнении водотока на данной территории [12].

Донные отложения играют роль аккумуляторов загрязняющих веществ и являются интегральным индикатором антропогенной нагрузки на окружающую среду [13]. Донный грунт и водная толща связаны между собой условиями равновесия. Как результат, изменение (например, загрязнение) в одном из компонентов приводит к изменению во втором. С одной стороны, аккумулируя тяжелые металлы, высокотоксичные органические вещества, донные отложения оказывают содействие самоочищению водной среды [14]. Однако с другой стороны, буферная способность отложений относительно загрязнителей не безгранична даже при полном прекращении их поступления в водотоки.

Донные отложения р. Уруп, представленные преимущественно песчаными фракциями с низким содержанием органического вещества (< 1,2 %) и слабощелочной реакцией среды (pH ≥ 7), выполняют важную геохимическую функцию аккумуляции тяжелых металлов [13]. Минералогический состав с преобладанием SiO_2 (~ 70 %) и Al_2O_3 (~ 10 %) определяет их сорбционную емкость [14]. Содержание микроэлементов в донных отложениях приведено в табл. 3.



Рис. 3. Распределение ИЗВ по исследуемым створам на р. Уруп (ширина розового полигона соответствует значению ИЗВ).
Fig. 3. Distribution of WPI by the studied sections on the Urup River (the width of the pink polygon corresponds to the WPI value).

Как следует из данных табл. 3, наибольшие концентрации тяжелых металлов зафиксированы в непосредственной близости от Урупского ГОКа, в районе пос. Уруп (точка отбора проб № 1). Данный участок характеризуется превышением концентраций в донных отложениях, по сравнению с данными для пресноводных объектов, по следующим элементам: Fe – 5024,6 мг/кг (в 115,5 раза), Mn – 264,4 мг/кг (в 352,5 раза) и Zn – 179 мг/кг (в 1,63 раза). Это связано с образованием устойчивых оксидных форм железа ($Fe_2O_3 \leq 4$ %), высокой подвижностью Mn в слабощелочной среде (pH ≥ 7) и формированием гидроксидных соединений и устойчивых комплексов с органическим веществом Zn, который является также индикатором горнодобывающей деятельности.

Наименьшие концентрации металлов обнаружены в районе ст. Удобная – х. Саньков (точка отбора проб № 5), где отмечается снижение содержания металлов в 2–3 раза по сравнению с верхними створами. Наблюдается изменение соотношений между элементами Fe/Mn – уменьшение их с 19 до 15 раз, а между Zn/Cd – с 337 до 61 раза. Причины снижения концентраций элементов связаны с увеличением расстояния от источника загрязнения и изменением гидродинамических условий в р. Уруп.

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях р. Уруп
Table 3. Content of heavy metals in bottom sediments of the Urup River

Точка отбора проб	Zn, мг/кг	Cu, мг/кг	Pb, мг/кг	Cd, мг/кг	Ni, мг/кг	Co, мг/кг	Fe, мг/кг	Mn, мг/кг
Уруп (пос. Уруп)	179	4,405	13,335	0,53	48,39	0,975	5 024,6	264,4
Уруп (пос. Юбилейный)	134,8	15,545	12,11	0,985	44,83	1,88	2 192,8	213,1
Уруп (ст. Преградная)	82,9	2,73	8,135	0,445	37,5	2,13	2 441,5	175,5
Уруп (ст. Передовая)	132,2	5,03	15,625	0,905	47,22	1,17	2 922,3	285,3
Уруп (ст. Удобная – х. Саньков)	34,6	1,445	5,075	0,565	26,49	1,53	1 373,4	89,5
Уруп (ст. Бесскорбная)	47,6	2,605	7,53	0,52	27,71	5,405	4 355,7	174,5
Пресноводные донные отложения [15]	110	43	28	0,35	55	–	43,5	0,75

Уровень загрязненности донных отложений отражает также коэффициент донной аккумуляции (КДА) (табл. 4), показывающий, во сколько раз концентрация тяжелых металлов в донных отложениях превосходит концентрацию этих элементов в воде р. Уруп.

Таблица 4. Коэффициенты донной аккумуляции тяжелых металлов в исследуемых створах
Table 4. Coefficients of bottom accumulation of heavy metals in the studied sections

	Значение КДА							
Точка отбора проб	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Co	Fe	Mn
Уруп (пос. Уруп)	294,408	101,264	–	66,25	–	46,4286	5 492,87	3 346,835
Уруп (пос. Юбилейный)	178,425	609,608	16,860	75,769	4801,2	80,8602	2 623,751	2 449,425
Уруп (ст. Преградная)	209,079	111,429	–	6,138	–	116,712	2 291,41	2 271,845
Уруп (ст. Передовая)	832,756	100,60	57,924	164,545	31827,5	69,851	4 007,268	2 333,742
Уруп (ст. Удобная – х. Саньков)	419,394	–	–	8,692	–	130,213	1 673,348	1 577,093
Уруп (ст. Бесскорбная)	155,175	–	–	54,737	–	52,732	5 703,04	1 475,687

В точках № 5 и № 6 (табл. 4) коэффициент донной аккумуляции по цинку наиболее высок, что коррелирует с концентрациями загрязняющего вещества в воде, существенно превышает величину ПДК и свидетельствует о значительном уровне хронического загрязнения водного объекта. В точках № 2 и № 3 по свинцу и кадмию соответственно значения коэффициента донной аккумуляции входят в интервал 16,7–75,8, что при низких концентрациях загрязняющих веществ в воде и донных отложениях обычно характеризует обстановку в водном объекте как относительно удовлетворительную (без признаков хронического загрязнения). Это обусловлено высокой миграционной активностью элементов в слабощелочной среде и относительно низкой их концентрацией в донных отложениях. Ранжирование элементов в донных отложениях р. Уруп по КДА представлено в табл. 5.

Таблица 5. Ранжирование элементов по КДА в донных отложениях р. Уруп
Table 5. Ranking of elements by KDA in bottom sediments of the Urup River

Ранг	Элемент	Макс. КДА	Интерпретация
1	Fe	5703,04	Чрезвычайно высокая аккумуляция
2	Mn	3346,835	Интенсивное накопление
3	Ni	31827,5	Аномально высокие значения
4	Zn	832,7559	Значительное накопление
5	Cd	164,545	Умеренная аккумуляция
6	Co	130,2128	Средний уровень накопления
7	Pb	57,924	Слабая аккумуляция
8	Cu	609,608	Локальные высокие значения

Согласно градации значений коэффициента донной аккумуляции, для р. Уруп коэффициент донной аккумуляции во всех точках по Fe и Mn свидетельствует о том, что концентрации загрязняющих веществ в воде существенно превышают величину ПДК, т. е. о высоком уровне хронического загрязнения водного объекта. Медь и свинец являются элементами фонового уровня с концентрациями ниже фоновых, слабой аккумуляцией в донных отложениях.

Одним из наиболее известных критериев оценки техногенного воздействия на донные отложения является также суммарный показатель загрязнения (Zc). Расчет проводили на основании методики Ю.Е. Саета [8], результаты индекса загрязнения донных отложений р. Уруп в исследуемых створах представлены на рис. 4.

Донные отложения р. Уруп характеризуются в основном средним уровнем загрязнения в соответствии с методикой Ю.Е. Саета [8], что соответствует значению Zc от 10,5 до 17,57 и обусловлено влиянием поступающих из хво-



Рис. 4. Суммарный индекс загрязнения (Zc) донных отложений р. Уруп.
Fig. 4. Total pollution index (Zc) of bottom sediments of the Urup River.

стохранилища Fe и Mn, а также значительным привносом с поверхностным стоком Ni и Zn с отходами Урупского ГОКа (рис. 4). Снижение антропогенной нагрузки на донные отложения идет практически равномерно по мере удаленности от хвостохранилища, и в границах ст. Бесскорбная уровень загрязнения отмечается как слабый.

Длительное загрязнение р. Уруп тяжелыми металлами (Pb, Zn, Cu, Fe, Mn) обусловливает необходимость применения комплексных биолого-геохимических методов рекультивации. Чувствительность горной экосистемы к антропогенным воздействиям требует использования щадящих технологий, среди которых фиторемедиация водных систем является приоритетной.

Предлагаемая стратегия фиторемедиации в горных условиях р. Уруп учитывает подбор видов фиторемедиантов с учетом высотной поясности (500–1200 м над уровнем моря) и гидрологического режима р. Уруп.

Для стабилизации эрозионно опасных склонов и иммобилизации металлов рекомендуем создание вдоль наиболее загрязненных участков реки в границах поселков Уруп, Юбилейный и Преградный защитных фитоценозов, включающих следующие виды:

- ива (*Salix spp.*) – обладает высокой фитоэкстракционной способностью к Pb и Zn (до 850 мг/кг в корнях) и укрепляет береговые почвы за счет развитой корневой системы;
- ольха серая (*Alnus incana*) – аккумулирует Cu (до 120 мг/кг), Fe (до 2 500 мг/кг) в листьях;
- тополь черный (*Populus nigra*) – благодаря значительной биомассе (до 12 т/га/год) и толерантности к Cd, Mn, эффективен для фитостабилизации.

На участках со сниженной скоростью течения р. Уруп ($V < 0,5$ м/с) рекомендуем применять рогоз узколистный (*Typha angustifolia*), способный накапливать до 200 мг/кг Zn и 45 мг/кг Pb в ризомах, снижая подвижность металлов.

Результаты моделирования с учетом опыта рекультивации горных рек Кавказа представлены в табл. 6.

Таблица 6. Прогноз изменения параметров экосистемы
Table 6. Forecast of changes in ecosystem parameters

Показатель	Исходное состояние	Через 5 лет
Концентрация Pb	119,7 × ПДК	≤ 10 × ПДК
Концентрация Zn	158 × ПДК	≤ 20 × ПДК
Биоразнообразие	Низкое	Восстановлено на 70 %
Класс качества воды	VII (чрезвычайно грязная)	V (грязная)

Из вышесказанного следует, что для решения экологических проблем р. Уруп в первую очередь необходимо урегулирование деятельности Урупского ГОКа в области экологии, рациональное ведение водного хозяйства, проведение целенаправленной работы по улучшению использования водных ресурсов, сокращение водопотребления в промышленности, в сельском и коммунальном хозяйстве, и, самое главное, усиление охраны водной среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований можно сделать следующие выводы. В настоящее время геоэкологическая ситуация в зоне действия Урупского ГОКа сложная, загрязнению подверглись практически все объекты природной среды. Негативное воздействие приобрело необратимый характер. Эксплуатация месторождения в течение более 30 лет нарушила природное равновесие и превратила всю территорию в зону с высокой техногенной нагрузкой и высокой степенью опасности для жизнедеятельности человека и нормального обитания местной флоры и фауны. В пределах территории Урупского ГОКа произошли изменения экологического состояния водных объектов: ухудшилось качество воды и донных отложений в р. Уруп вследствие загрязнения шахтными водами и промышленными стоками.

Результаты исследования воды в р. Уруп показали, что класс качества воды изменяется от VII – «чрезвычайно грязная» (створы пос. Уруп, Юбилейный и ст. Преградная), что обусловливается влиянием стоков с хвостохранилища, до V – «грязная» (ст. Передовая и ст. Удобная – х. Саньков). В створах 4–6 значения ИЗВ изменяются в 2,5 раза – с VI класса качества воды – «очень грязная» (ст. Бесскорбная) до V класса. Небольшое увеличение значение ИЗВ в створе 6 ст. Бесскорбная обусловлено влиянием сброса неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод жилищно-коммунального хозяйства.

Закономерности миграции химических элементов в системе «хвостохранилище – водная среда» района медно-колчеданного месторождения. Токсичные элементы в составе водных растворов и пылевых частиц распространяются за пределы хвостохранилища, формируя ореолы загрязнения, что приводит к развитию техногенной и биогеохимической аномалии. По-

вышенный фон марганца, меди, железа и других элементов также обусловлен тем, что породы в районе содержат их в значительном количестве в своем составе. Основная часть загрязняющих веществ аккумулируется в донных отложениях, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициентов донной аккумуляции и суммарный индекс загрязнения. В этой связи можно говорить об очень серьезном уровне хронического загрязнения р. Уруп в зоне влияния ГОКа.

На момент проведения исследования проблема загрязнения р. Уруп под влиянием отработанного хвостохранилища Урупского ГОКа сохраняет свою актуальность, что обусловливает необходимость системного мониторинга и применения современных технологий для минимизации негативных последствий.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что даже после вывода из эксплуатации хвостохранилища I очереди миграция загрязняющих веществ в грунтовые и поверхностные воды может продолжаться в течение длительного времени (десятки лет). Данный факт подтверждает важность разработки и внедрения долгосрочных стратегий экологического мониторинга и рекультивации территорий, подверженных воздействию отработанных хвостохранилищ.

Современные исследования демонстрируют высокую эффективность применения аборигенных видов фиторемедиантов для восстановления водных экосистем, подверженных техногенному загрязнению. В условиях горных ландшафтов Карачаево-Черкесии использование адаптированных видов растений позволяет решать комплекс задач по экологической реставрации. Внедрение фиторемедиационных технологий обеспечивает последовательное улучшение экологического состояния р. Уруп. В первую очередь это проявляется в снижении подвижности тяжелых металлов в донных отложениях за счет процессов фитостабилизации. Одновременно наблюдается восстановление почвенно-растительного покрова береговой зоны, что способствует естественной защите от эрозионных процессов. В долгосрочной перспективе данные изменения приводят к значительному улучшению гидрохимических показателей водной среды.

Особое значение имеет использование автохтонных видов растений, таких как *Salix spp.*, *Alnus incana* и *Populus nigra*. Их применение не только гарантирует высокую приживаемость в специфических горных экотопах, но и минимизирует риски биологических инвазий, которые могут нарушить хрупкое экологическое равновесие региона.

Важным аспектом успешной реализации фиторемедиационных мероприятий является вовлечение местного населения в программы мониторинга и очистки реки. Как свидетельствуют результаты исследований, участие местных сообществ позволяет на треть повысить сохранность фитоценозов, одновременно сокращая затраты на мониторинговые мероприятия. Комплексное применение фиторемедиационных технологий с учетом региональных особенностей и с активным участием местного населения создает синергетиче-

ский эффект. Реализация данного подхода позволяет прогнозировать сокращение антропогенной нагрузки на 45–60 % с параллельным восстановлением биоценотических функций речной экосистемы Урупа. Эти результаты подтверждают перспективность выбранной стратегии для решения задач экологической реставрации в горных регионах.

Таким образом, для обеспечения устойчивого состояния водных экосистем в районе расположения хвостохранилища требуется реализация комплексных мер, включающих непрерывный контроль качества воды, прогнозирование возможных изменений и внедрение эффективных методов реабилитации загрязненных территорий.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А.А. Тяжелые металлы в компонентах окружающей среды: миграция, трансформация, токсическое действие // Геохимия окружающей среды. 2019. № 2. С. 15–24.
2. Кривошеева Н.С. Влияние загрязнения водных объектов на здоровье населения // Здоровье населения и среда обитания. 2017. № 10. С. 32–36.
3. Онищенко Г. Г. Обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения в условиях антропогенного загрязнения окружающей среды // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100. № 1. С. 4–8.
4. Allan J.D. & Castillo M.M. Stream ecology: Structure and function of running waters (2nd ed.). Springer, 2007.
5. Романенко В.Д. Основы гидроэкологии / В.Д. Романенко. К.: Генеза, 2004. 664 с.
6. Salomons W. & Forstner U. Metals in the hydrocycle. Springer-Verlag, 1984.
7. Гуляев Ю.П. Экологическая геохимия техногенеза: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2002.
8. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Сает, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 335 с.
9. Баймакова Е.В. Оценка влияния на окружающую среду хвостохранилища Балхашской обогатительной фабрики // Вестник КазНУ. Серия географическая. 2002. № 2 (15). С. 48–57.
10. Кадастр месторождений и проявлений россыпного золота центральной и Западной частей Северного Кавказа. 1969 г.
11. Скрипченко Н.С. Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтовых формаций. М.: Недра, 1972 г.
12. Галатова Е.А., Шестаков А.Ю., Капанадзе Г.Д. Особенности накопления и распределения экотоксикантов в донных отложениях и водорослях // Биомедицина. 2010. № 5. С. 58–62.
13. Техногенное загрязнение речных экосистем / под ред. В.Е. Райнина и Г.Н. Виноградовой. М.: Научный мир, 2002. 140 с.
14. Линник П.Н. Влияние различных факторов на десорбцию металлов из донных отложений в условиях экспериментального моделирования // Гидробиологический журнал. 2006. Т. 42. № 3. С. 97–113.
15. Forstner U. Metal concentration in freshwater sediments – natural background effects // Proceedings of Int. Conf. “Interaction between sediments and fresh water”. Amsterdam: Hague, 1977. P. 94–103.

REFERENCES

1. Smirnov A.A. Heavy metals in environmental components: migration, transformation, toxic effect. *Geochemistry of the environment.* 2019. No. 2. P. 15–24.
2. Krivosheeva N.S. Impact of water body pollution on public health. *Population health and habitat.* 2017. No. 10. P. 32–36.

3. Onishchenko G.G. Ensuring sanitary and epidemiological well-being of the population in conditions of anthropogenic pollution of the environment. *Hygiene and Sanitation*. 2021. Vol. 100. No. 1. P. 4–8.
4. Allan J.D. & Castillo M.M.. Stream ecology: Structure and function of running waters (2nd ed.). Springer, 2007.
5. Romanenko V.D. Foundations of hydro/ecology / V.D. Romanenko. K.: Geneza, 2004. 664 s. (In Russ.).
6. Salomons W. & Forstner U. Metals in the hydrocycle. Springer-Verlag, 1984.
7. Gulyaev Yu.P. Ecological geochemistry of technogenesis: study guide. Tomsk: TPU Publishing House, 2002. (In Russ.).
8. Geochemistry of the environment / Yu.E. Saet, B.A. Revich, E.P. Yanin et al. M.: Nedra, 1990. 335 p. (In Russ.).
9. Baimakova E.V. Assessment of the environmental impact of the tailings storage facility of the Balkhash processing plant. *Newsletters of Kazan National University.* Geogr. Series. 2002. No. 2 (15). P. 48–57.
10. Cadastre of placer gold deposits and occurrences in the central and western parts of the North Caucasus. 1969.
11. Skripchenko N.S. Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basalt formations M.: Nedra, 1972. (In Russ.).
12. Galatova E.A., Shestakov A.Yu., Kapanadze G.D. Features of accumulation and distribution of eco/toxicants in bottom sediments and algae. *Biomedicine*. 2010. No. 5. P. 58–62.
13. Technogenic pollution of river ecosystems / Ed. by V.E. Rainin and G.N. Vinogradova. M.: Scientific World, 2002. 140 p. (In Russ.).
14. Linnik P.N. Impact of various factors on metal desorption from bottom sediments under experimental modeling conditions. *Hydro/biological Journal.* 2006. Vol. 42. No. 3. P. 97–113.
15. Forstner U. Metal concentration in freshwater sediments – natural background effects. Proceedings of Int. Conf. "Interaction between sediments and fresh water". Amsterdam: Hague, 1977. P. 94–103.

Сведения об авторах:

Бегдай Инна Владимировна, канд. техн. наук, доцент, кафедра экологии и биогеографии, медико-биологический факультет, заведующая НУЛ биогеохимии окружающей среды, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1. Scopus: 57202445094; ORCID: 0000-0001-7675-8078; e-mail: algae@mail.ru

Мишвелов Евгений Георгиевич, д-р биол. наук, профессор, кафедра экологии и биогеографии, медико-биологический факультет, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1. Scopus: 57191577389; e-mail: mishvelov@mail.ru

Харин Константин Викторович, канд. геогр. наук, доцент, заведующий кафедрой экологии и биогеографии, медико-биологический факультет, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1. ID исследователя: I-3917-2016; Scopus: 56177504800; e-mail: k-harin79@mail.ru

Шкарлет Константин Юрьевич, канд. геогр. наук, доцент, кафедра экологии и биогеографии, медико-биологический факультет, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1. Scopus: 557202443382; e-mail: shcarlet@mail.ru

About the authors:

Inna V. Begday, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Biogeography, Faculty of Medicine and Biology, Head of the Scientific and Educational Laboratory of Environmental Biogeochemistry, North Caucasus Federal

University; 1, Pushkin st., Stavropol, 355017, Russia; Scopus: 57202445094; ORSID: 0000-0001-7675-8078; e-mail: algae@mail.ru

Evgeny G. Mishvelov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Ecology and Biogeography, North-Caucasus Federal University; 1, Pushkin st., Stavropol, 355017, Russia; Scopus: 57191577389; e-mail: mishvelov@mail.ru

Konstantin V. Kharin, PhD, Associate Professor, Head of Chair of the Department of Ecology and Biogeography, Faculty of Medicine and Biology, North Caucasus Federal University; 1, Pushkin st., Stavropol, 355017, Russia; Researcher ID: I-3917-2016; Scopus: 56177504800; e-mail: k-harin79@mail.ru

Konstantin Yu. Shkarlet, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Biogeography, Medical and Biological Faculty, North Caucasus Federal University; 1, Pushkin st., Stavropol, 355017, Russia; Scopus: 557202443382; e-mail:shcarlet@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 11.05.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 19.05.2025.
Принята к публикации / Accepted 07.07. 2025.

REQUIREMENTS TO MATERIALS TO BE ACCEPTED FOR PUBLICATION IN «WATER SECTOR OF RUSSIA» JOURNAL

Papers in Russian, never published anywhere before, can be accepted for publication. The optimal size of an article is to be 16–24 thousand of characters with blanks, not more than 20 pages including figures and tables.

An article is to be accompanied with a paper with information about the authors (complete name, position, academic degree, full name of an institution/company, postal address, telephone number, fax, e-mail address).

A paper should contain a Universal Decimal Classification index, key words and an abstract. The following structure can be optimal: a brief introducing part with clearly defined and characterized problem under discussion, a conceptual part, concrete conclusions from the stated material, and the list of references.

An article is to be accompanied with the English translation of the name of the article, key words, the abstract, short information on the authors (name, full and abbreviated name of the institution/company, postal address).

The text is to be typed without division of words with width alignment, Times New Roman, 12 point type, 1,5 line spacing, 2,5 cm margins from all sides. Roman figures are to be typed in the Roman type.

Numerical data are to be arranged as tables. The tables should not be ponderous. Each table is to have a number and a name. Tables are to be through numbered. Abbreviation of words in the tables are not allowed, units of measurement excluded. Numerical values in the tables and in the text are to be in the CI units.

References are to be presented in a general list in the end of the paper. References are to be numbered and arranged in a bibliographic list in accordance with GOST P 7.0.5 2008 «Bibliographic reference. General requirements and rules of composition». References in the text are to be given in square brackets (for instance, [4]), in successive order.

Figures, drawings, charts, and diagrams are to be inserted into the text as separate files each. General number of figures is not to exceed 10–12.

An electronic version of an article in Microsoft Word is to be sent with e-mail. Photographs, drawings, figures, charts, diagrams are to be presented additionally as separate files in JPEG and TIFF with resolution at least 300 dpi, 9×12 cm at least, all diagrams in Excel.

Manuscripts are reviewed and edited in RosNIIVKh editorial office.

Materials meant for publication are to be submitted to RosNIIVKh, e-mail address: info@waterjournal.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ, ПРИНИМАЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛ «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ»

К публикации принимаются ранее не публиковавшиеся статьи на русском языке. Оптимальный объем статей составляет 0,4–0,6 авторского листа (16–24 тыс. знаков с пробелами, не более 20 с., включая рисунки и таблицы).

Статьи должны иметь **индекс УДК, ключевые слова** (10–15 слов) **и автореферат** (аннотацию), объем аннотации – 150–200 слов. Оптимальной является следующая структура статьи: краткая вводная часть с четкой формулировкой и характеристикой обсуждаемой проблемы, содержательная часть, конкретные выводы, вытекающие из изложенного материала, список литературы.

К статье необходимо приложить **перевод на английский язык названия, ключевых слов, аннотации и сведений об авторах** (ФИО полностью, должность, ученая степень и ученое звание, полное наименование организации, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты).

Текст набирается **без переносов** с выравниванием по ширине страницы, шрифт Times New Roman, **кегль 12, межстрочный интервал 1,5, поля 2,5 см со всех сторон.** Римские цифры набираются в английском регистре.

Цифровые данные оформляются в виде таблиц. Каждая таблица должна иметь порядковый номер и название. Нумерация таблиц – сквозная. Сокращения слов в таблицах не допускаются, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблицах и тексте должны приводиться в единицах измерения СИ (обязательных).

Ссылки на литературные источники следует давать в квадратных скобках (например, [4]), порядок нумерации последовательный – по мере появления ссылок в тексте статьи.

Цитируемая литература приводится списком в конце статьи. Литературные источники должны быть пронумерованы и оформлены в библиографический список в соответствии с ГОСТом Р 7.0.5 2008. Пристатейный список литературы на латинице References в системе транслитерации LC размещается сразу за списком литературы.

Рисунки, чертежи, графики, схемы, диаграммы вставляются в текст статьи как объект. **Общее количество рисунков в статье не должно превышать 10–12.**

Для публикации представляется электронный вариант статьи в формате текстового редактора Microsoft Word. **Фотографии, рисунки, чертежи, графики, схемы, диаграммы дополнительно представляются в виде отдельного файла (рисунки, чертежи, графики, схемы – в формате Corel Draw, tiff, jpg разрешением 300 dpi размером не менее 9×12 см, диаграммы – в формате Excel).**

Материалы для публикации необходимо направлять в РосНИИВХ по электронной почте info@waterjournal.ru.

Редакторы: Т.М. Принцева, Н.А. Валек, В.А. Федотов
Перевод А.Б. Кочев
Подписано в печать 07.08.2025. Дата выхода в свет 22.08.2025.
Формат 70x100 1/16. Усл. печ. л. 7. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «ДжиЛайм»,
юридический адрес: 620078, г. Екатеринбург, ул Мира 37-25.
Тел.: +7(343)362-42-28, www.glime.ru, e-mail: g_lime@mail.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Федеральное агентство водных ресурсов является органом исполнительной власти по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в сфере водных ресурсов.

Адрес: 117292, Москва, ул. Кедрова, дом. 8, корп. 1
Станции метро: Академическая, Профсоюзная
Телефон: 8 (499) 125-52-79
E-mail: water@favr.ru, http://voda.mnr.gov.ru

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ФГБУ РосНИИВХ – научное подразделение Федерального агентства водных ресурсов, создан для научного обеспечения государственных функций управления использования и охраны водных ресурсов, разработки нормативно-методической и проектной документации, направленной на устойчивое развитие водного хозяйства России и экономическую безопасность водопользования.

В структуру института входят филиалы в Екатеринбурге, Владивостоке, Чите, Перми, Уфе.

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ ЖУРНАЛА:
Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а
Тел.: (863) 285-30-24
Сайт: http://wrm.ru, e-mail: rwec@rwec.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Рег. номер ПИ № ФС77-82772 от 4 марта 2022 г.

Выходит с 1999 года 6 раз в год.

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ И РЕДАКЦИИ: 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23
Тел. главного редактора (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© ФГБУ РосНИИВХ

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

The title is registered in the State Committee of the Russian Federation for Press on May 21, 1999. Registration Number 018825

The journal is issued since 1999 6 times a year.

Address of the Publisher and Editoral Board: Ul. Mira, 23, Ekaterinburg 620078 Russia
Chief Editor (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© FGBU RosNIIVKh

The journal is included into the List of the scientific journals and editions subject to peer-review where the main scientific outcomes of the thesis for academic degrees of doctors and candidates of sciences are to be published

Индекс / Index 39076

