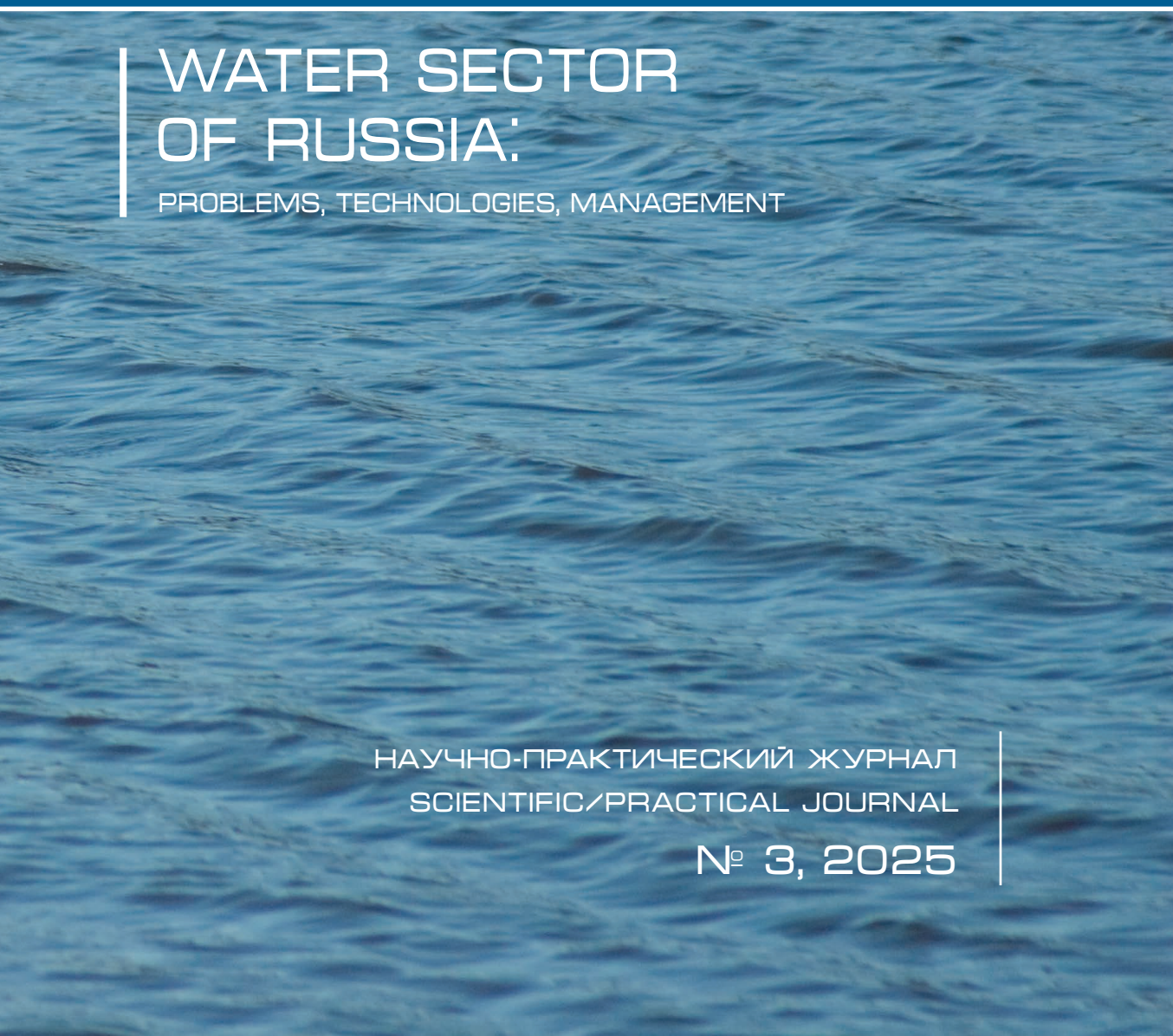
ISSN 1999-4508 (Print)
ISSN 2686-8253 (Online)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 3, 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., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (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

№ 3, 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, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (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

НАУКА В ЛИЦАХ

Ендон Гармаев удостоен звания академика РАН.....5
Высокое признание научных достижений.....6

УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Методика оценки потенциальной опасности плановых деформаций речных русел
В.М. Католиков, Н.И. Католикова, О.А. Петровская.....7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Особенности формирования качества воды Аргазинского водохранилища в периоды низких уровней
А.Ю. Орлова, А.В. Богомолов, А.И. Лучников, Ю.С. Ляхин, М.В. Антонова.....21
Динамика наводнений на реке Оби в черте города Барнаула
С.Ю. Самойлова, В.А. Казанцева.....35
Влияние климатического снижения весеннего стока и гидротехнического регулирования на условия воспроизводства рыб Азово-Донского рыбохозяйственного района (на примере участка поймы у станицы Раздорской)
А.А. Семенова, А.В. Гончаров, А.Г. Георгиади, И.П. Милюкова.....50
Региональные предельно допустимые концентрации молибдена для водных объектов бассейна реки Терек
С.Л. Алита, Ф.А. Атабиева.....64

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

Применение нейросетевого моделирования для идентификации водоемов в бассейнах рек по данным дистанционного зондирования Земли
Н.А. Душенко, М.М. Головачева, М.В. Капустин, К.С. Суртаева.....74
Водохозяйственная наука: инструментарий определения исследовательских фронтов
Н.А. Валек, В.А. Благинин, Е.В. Соколова.....95
Требования к оформлению материалов.....115

CONTENT

SCIENCE IN PERSONS

Endon Garmaev is honored with the title of Academician of Russian Academy of Sciences.....5

High acknowledgment of scientific achievements.....6

WATER SECTOR MANAGEMENT

Methodology for assessing the potential danger of horizontal deformations of river channels
V.M. Katolikov, N.I. Katolikova, O.A. Petrovskaya.....7

WATER RESOURCES RESEARCH

Features of the formation of the Argazinsky reservoir water quality during the low-level periods
A.Y. Orlova, A.V. Bogomolov, A.I. Luchnikov, Y.S. Lyakhin, M.V. Antonova.....21

Flood dynamics on the Ob River at the city of Barnaul
S.Y. Samoilova, V.A. Kazantseva.....35

The spring runoff climatic decrease and hydraulic engineering regulation influence on the fish reproduction conditions in the Azov-Don fishery area (the floodplain area near the village of Razdorskaya as a study case)
A.A. Semenova, A.V. Goncharov, A.G. Georgiadi, I.P. Milyukova.....50

Regional maximal permissible molybdenum concentrations for water bodies in the Terek River basin
S.L. Alita, F.A. Atabieva.....64

INFORMATION/ANALYTICAL SUPPORT OF THE WATER SECTOR FUNCTIONING

Application of neural network modeling for identification of water bodies in river basins using Earth satellite remote sensing data
N.A. Dushenko, M.M. Golovacheva, M.V. Kapustin, K.S. Surtayeva.....74

Water science: Suite of tools for identification of research fronts
N.A. Valek, V.A. Blaginin, E.V. Sokolova.....94

Requirements to the articles to be accepted.....115

Ендон Гармаев удостоен звания академика РАН

30 мая 2025 г. в Москве на общем собрании членов РАН академиком по отделению наук о Земле избран директор Байкальского института природопользования СО РАН (г. Улан-Удэ) профессор, доктор географических наук и член редколлегии нашего журнала Ендон Жамьянович Гармаев.



За присвоение звания бурятскому ученому проголосовало абсолютное большинство членов общего собрания Российской академии наук. Директор Байкальского института природопользования СО РАН, вице-президент Русского географического общества Ендон Жамьянович Гармаев – авторитетный специалист в области гидрологии, физической географии и геоэкологии, автор и соавтор более 340 научных работ, учебно-методических пособий и атласов.

В числе его ключевых достижений – разработка гидрологических основ использования и охраны водных ресурсов рек бассейна озера Байкал, включая российскую и монгольскую территории, а также методик расчета стока рек Забайкалья и Центральной Азии, теоретических основ совместного использования и охраны водных ресурсов трансграничных рек. Ученый активно занимается исследованием закономерностей и геоэкологических особенностей трансформации компонентов природной среды в условиях изменения климата, определением трендов процессов деградации и опустынивания земель в различных климатических зонах, исследованием современного распространения и развития наледей в Селенгинском среднегорье и их влияния на природно-антропогенные системы, разработкой научных рекомендаций по дальнейшему экологически безопасному регулированию уровня воды в озере Байкал. Под руководством Ендона Жамьяновича реализовано множество научных проектов, связанных с изучением окружающей среды Байкальской природной территории.

Многие годы Ендон Жамьянович передает свои знания и опыт молодым ученым. Он преподавал в Бурятском государственном университете, был заместителем декана естественно-географического факультета, заведующим кафедрой физической географии, директором Института экологии БГУ. С 2008 г. Е.Ж. Гармаев перешел на работу в Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, директором которого он является в настоящее время.

Уверены, что экспертная работа Е.Ж. Гармаева в составе редколлегии нашего журнала поднимет научный уровень публикуемых статей и поможет молодым исследователям добиваться высоких результатов.

Высокое признание научных достижений

Директор Федерального научного центра агроэкологии Российской академии наук доктор сельскохозяйственных наук, профессор Александр Иванович Беляев избран в члены-корреспонденты РАН на общем собрании членов Российской академии наук. Это – закономерный итог многолетнего труда и личного вклада ученого в развитие отечественной и мировой науки.



Александр Иванович Беляев – известный ученый и организатор науки в области сельского хозяйства, защитного лесоразведения, борьбы с опустыниванием и деградацией земель, автор и соавтор более 230 научных работ, в том числе – 32 монографий, 38 патентов. А.И. Беляев является инициатором и руководителем работ по созданию аналитической геоинформационной системы «Опустынивание и его мониторинг», которая включает инновационную систему сбора и анализа данных из различных источников.

Александр Иванович известен циклом фундаментальных работ, обосновывающих необходимость развития и применения агролесо- и фитомелиорации для восстановления нарушенных земель засушливой зоны России, и разработкой для этого ряда адаптивных, инновационных технологий. Сегодня эти технологии, успешно внедренные на обширных территориях юга России, не только демонстрируют передовые достижения, но и служат вдохновляющим примером для следующих поколений ученых.

Помимо научной деятельности, А.И. Беляев имеет большой организаторский и педагогический опыт. Под его руководством в Федеральном научном центре агроэкологии РАН строят карьеру около 100 молодых специалистов. Сегодня наукометрические показатели ФНЦ агроэкологии РАН являются одними из самых высоких в стране благодаря созданной его директором творческой атмосфере и возможности для реализации научного потенциала ученых.

А.И. Беляев активно развивает международное сотрудничество. Сотрудники ФНЦ агроэкологии РАН включены в Программу научных исследований и прикладных работ Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра. Реализуется совместный проект с учеными Республики Азербайджан «Технологические аспекты восстановления пойменных лесов трансграничной части реки Самур», достигнута договоренность с Министерством природных ресурсов и экологии Республики Азербайджан о создании зеркального карбонового полигона, активно развиваются и другие значимые международные инициативы.

Разносторонняя деятельность А.И. Беляева, его научные достижения – пример редкого сочетания эрудиции ученого, инициативы и новаторского подхода руководителя к решению важнейших экологических задач.

УДК 536.53.09 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-7-20*

Методика оценки потенциальной опасности плановых деформаций речных русел

В.М. Католиков ✉, Н.И. Католикова, О.А. Петровская

✉ v.katolikov@mail.ru

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В данной работе предложена методика экспертной оценки опасности горизонтальных деформаций берегов речных русел вблизи населенных пунктов, обусловленных естественными русловыми процессами и не связанных с влиянием каких-либо гидротехнических сооружений. **Методы.** Методика опирается на постулаты гидроморфологической теории руслового процесса, на усовершенствованную гидроморфологическую классификацию речных русел и типов руслового процесса и на многолетний опыт использования указанной теории. Она позволяет на качественном уровне оценить степень опасности размыва речных берегов на основе установленного по космическим снимкам типа руслового процесса и морфологической принадлежности участка деформаций. **Результаты.** Методика рассчитана на использование специалистами органов власти субъектов Российской Федерации, принимающих управленческие решения по защите населения от воздействия вод, для своевременного исключения ошибки при принятии этих решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плановые деформации русла, устойчивость берега, тип руслового процесса, гидроморфологический тип русла, морфологические элементы русел.

Финансирование: Исследование выполнено в Государственном гидрологическом институте по теме 1.5 НИР Росгидромета «Развитие методов оценки ресурсов поверхностных вод Российской Федерации, расчетов гидрологических характеристик и моделирования гидрологических процессов».

Для цитирования: Католиков В.М., Католикова Н.И., Петровская О.А. Методика оценки потенциальной опасности плановых деформаций речных русел // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 7–20. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-7-20, EDN: ONCNPW

Methodology for assessing the potential danger of horizontal deformations of river channels

Victor M. Katolikov ✉, Nataliya I. Katolikova, Olga A. Petrovskaya

✉ v.katolikov@mail.ru

State Hydrological Institute, Saint-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. In this paper, a methodology for the expert assessment of the danger of horizontal deformations of riverbed banks near settlements caused by natural channel processes unrelated to the influence of any hydraulic structures is proposed. **Methods.** The methodology is based on the postulates of the hydromorphological theory of the channel process, on the improved hydromorphological classification of riverbeds and types of riverbed process, and on the long-

© Католиков В.М., Католикова Н.И., Петровская О.А., 2025

term experience of using this theory. It makes it possible to assess the degree of danger of riverbank erosion at a qualitative level based on the type of riverbed process established from satellite images and the morphological affiliation of the deformation site. **Results.** The method is designed for use by specialists from the authorities of the constituent entities of the Russian Federation and localities making managerial decisions to protect the population from the effects of dangerous hydrological phenomena and to take necessary measures for timely prevention of errors in making the above decisions.

KEYWORDS: horizontal deformations of channel, bank stability, type of channel process, hydromorphological type of channel, orographic channel, floodplain channel, concave bank.

Financing: The research was performed at the State Hydrological Institute on the theme 1.5 of the research project of the Roshydromet "Development of methods for assessing surface water resources of the Russian Federation, calculations of hydrological characteristics and modeling of hydrological processes".

For citation: Katolikov V.M., Katolikova N.I., Petrovskaya O.A. Methodology for assessing the potential danger of horizontal deformations of river channels. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 3. P. 7–20. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-7-20, EDN: ONCNPW

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматриваются опасные гидрологические явления на реках, обусловленные негативным воздействием русловых процессов и связанные с естественными плановыми размывами берегов в пределах населенных пунктов. При этом локальные деформации берегов, связанные с гидротехническими сооружениями, должны быть установлены в проектах этих сооружений. Для предотвращения разрушительных последствий естественных русловых процессов и организации соответствующей защиты требуется оценка состояния речных русел с использованием определенной системы критериев опасности плановых деформаций.

В настоящее время критерии опасности плановых деформаций берегов водных объектов установлены двумя нормативными документами: СП 482.1325800.2020[1] и СП 115.13330.2016[2]. В СП 482.1325800.2020 опасными признаны деформации берегов рек со скоростью перемещения линии уреза и бровки абразионного уступа более 1,0 м/год. В СП 115.13330.2016 опасность деформаций оценивается количественно (табл. 1). Но в обоих документах отсутствует информация о причинах береговых деформаций, что затрудняет прогноз их развития.

В отечественной научной литературе опасность плановых деформаций берегов не выделяется из опасности общих деформаций речных русел. Детально комплексные представления об опасности русловых деформаций на реках в ненарушенных условиях изложены в работах [1, 2], где предлагается оценивать опасность русловых процессов по 6-балльной шкале на основе показателей устойчивости русел:

[1] СП 482.1325800.2020. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. Издание официальное. М., Стандартинформ. 2020. 49 с.
[2] СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01–95. М., Стандартинформ. 2018. 43 с.

числа В.М. Лохтина:

$$\Lambda = \frac{d}{H}$$

и коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева:

$$K_C = \frac{d}{b_p I},$$

где d – средняя крупность донных отложений, I – уклон реки, b_p – ширина русла реки.

В каждой выделенной степени опасности этим показателям устойчивости русла соответствуют: скорость плановых деформаций русел, смещение форм руслового рельефа, протяженность зон размыва, периодичность развития и спрямления излучин и углубления и обмеления рукавов [2]. Классификация участков рек по опасности проявлений русловых процессов в части плановых деформаций и степени устойчивости русел представлена в табл. 2.

Таблица 1. Категории опасности русловых деформаций по СП 115.13330.2016
Table 1. Hazard categories of channel deformations according to SP 115.13330.2016

Показатели, используемые при оценке опасности природного процесса	Категории опасности процессов			
	Чрезвычайно опасные (катастрофические)	Весьма опасные	Опасные	Умеренно опасные
Площадная пораженность территории, %	–	8–10	6–8	5–6
Объем относительно одновременных деформаций пород, млн м^3/год	–	0,2–0,3	< 0,04	< 0,08
Скорость развития, м/год	–	> 3	1–3	0,1–1

Таблица 2. Степень опасности русловых процессов в зависимости от устойчивости русла и скорости плановых деформаций
Table 2. The degree of hazard of channel processes depending on the stability of the channel and the rate of planned deformations

Степень опасности русловых процессов (устойчивость русел)	Баллы	Показатели устойчивости русла		Скорости размыва (намыва) берегов, м/год		Максимально возможные размывы берегов, м/год
		Λ	Kc	Малые реки	Средние и большие	
Очень высокая (абсолютно неустойчивые)	5	< 0,5	< 2	> 5	> 50	> 100
Высокая (неустойчивые)	4	0,5–2	2–6	2–5	> 10	> 50
Повышенная (слабо устойчивые)	3	2–5	6–15	0,5–2	5–10	> 20
Умеренная (относительно устойчивые)	2	5–10	15–20	0,1–0,5	2–5	> 10
Слабая (устойчивые русла)	1	10–50	20–100	< 0,1	< 2	> 5
Отсутствие опасности (абсолютно устойчивые)	0	> 50	> 100	Размыва нет		

В методике, разработанной учеными Московского государственного университета (МГУ), предусмотрена и оценка опасности антропогенной измененности русла, ранжированной в баллах в зависимости от размеров реки и длины измененных участков.

Помимо частных и локальных показателей опасности, методика МГУ предлагает также интегральную территориальную характеристику – экологическую напряженность региона, характеризующую условия жизнедеятельности населения, определяемые русловыми процессами. Единый критерий экологической напряженности получают суммированием частных баллов с весовым коэффициентом, учитывающим вклад каждого фактора. Данный критерий ранжирует регионы по 6-балльной шкале (от 0 до 5).

В зарубежной научной литературе (разработанной преимущественно в США) часто применяется столь же комплексный геоморфологический метод оценки влияния землепользования на динамику речных русел. Чаще всего используются два показателя эрозионной опасности берегов [3–11]:

– Bank Erosion Hazard Index (BEHI) – индекс эрозионной опасности берега,

– Near-Bank Stress (NBS) – прибереговая нагрузка.

Оба параметра предложены Д. Росгеном как составляющие его модели Watershed Assessment of River Stability and Sediment Supply (WARSSS) [3, 8, 10], представляющей собой количественный метод определения влияния землепользования на динамику речных русел и наносов.

Индекс BEHI фокусируется на характеристиках берегов, влияющих на их эрозию, среди которых морфометрические характеристики русла (отношение высоты берега к глубине потока при руслонаполняющем расходе воды и угол берегового откоса), состав слагающих берег пород, их стратификация и фильтрационные свойства, густота и глубина корневой системы прибрежной растительности, а также степень захламленности берега ее остатками.

Все они определяются специфически и не совпадают с принятыми в России характеристиками [9]. Для каждого из этих параметров построены связи с соответствующим частным индексом BEHI (по индексу BEHI выделяются шесть категорий опасности от очень низкой до экстремальной со значениями от 1 до 10) [10]. Полный индекс опасности берега определяется как сумма частных индексов всех пяти параметров.

Индекс BEHI корректируется в зависимости от состава пород и слоистости берега. Берега, сложенные коренными породами и валунами, соответствуют низшей эрозионной опасности. Если берег сложен крупной галькой и мелкими валунами, то из общей суммы индекса BEHI вычитают 10 баллов, а в случае преобладания песчаной фракции прибавляют 10 баллов. В зависимости от слоистости берега добавляют от 5 до 10 баллов.

Индекс NBS оперирует внутрирусловыми характеристиками, оценивающими степень гидравлической нагрузки на берег, обусловленной формой русла. Принимается, что из общего сечения потока на берег воздействует одна треть площади, примыкающая к размываемому берегу, а эрозия берега зависит от положения створа (рис. 1) [4]. В зависимости от этого положения, морфоме-

трических и гидравлических характеристик русла в створе при руслонаполняющем расходе воды предлагаются разные способы оценки NBS [9, 11].

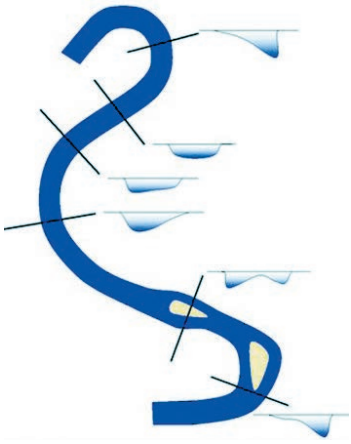


Рис. 1. Поперечные сечения русла, определяющие гидравлическую нагрузку на берег.
Fig. 2. Cross-sections of the riverbed that determine the hydraulic load on the shore.

Кроме того, в США применяется классификация эрозионной опасности берегов, оперирующая шестью категориями опасности с учетом грунтов берега и закрепления их растительностью [5]. Все эти индексы непросты и трудоемки в определении.

Таким образом, предлагаемые методики оценки опасности размывов речных берегов являются чрезвычайно затратными, требующими проведения детальных полевых обследований и участия специалистов высокой квалификации в области геоморфологии, что затрудняет их использование. В результате на практике предварительная гидроморфологически обоснованная оценка опасности деформаций берегов вообще не проводится, а в итоге идет бессистемная борьба с последствиями разрушительных деформаций.

В этой связи представляется очевидной необходимость создания методики превентивного определения опасности возможных плановых деформаций русел рек вблизи населенных пунктов, увязанной с морфологическими особенностями участка деформаций. Очень важными требованиями при этом являются простота и доступность такой методики для пользователей, ее ориентация на использование общедоступных космических снимков и топографических карт и планов и отсутствие необходимости проведения специальных гидроморфологических полевых обследований.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагаемая методика разработана в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) в рамках бюджетной темы на основе гидроморфологической теории руслового процесса. Ключевым моментом в ней является динамика дискретных русловых форм, которая проявляется в деформациях речных русел (типах руслового процесса) и которая должна быть распознана при дешифрировании космических снимков и топокарт с учетом разработанных ранее методов

дешифрирования морфологических характеристик речных русел и пойм, вычленяемых в рамках гидроморфологической теории руслового процесса[3].

В методике использованы гидроморфологические классификации:

– речных русел[4],

– типов руслового процесса[5],

– интенсивности плановых деформаций и степени их опасности.

В первых двух классификациях в лаконичной форме схематизированы и описаны гидроморфологические типы русел, русловых процессов, соответствующие им схемы русловых деформаций и внешние классификационные признаки каждого типа, а в третьей классификации русловые деформации качественно ранжированы по интенсивности плановых деформаций берегов в пределах морфологических элементов речных русел.

Предлагаемая методика требует начальных навыков работы с картографическим материалом и космическими снимками (из доступных интерактивных программ типа Google Earth), т. е. наличия представлений о визуальном дешифрировании морфологического строения речных русел и пойм. В данном случае речь идет о специальном виде дешифрирования – гидроморфологическом дешифрировании типов речных русел и русловых форм.

Выделяют прямые и косвенные дешифровочные признаки. Прямые признаки играют главную роль при распознавании объектов. К ним относятся:

– форма и размер водотока;

– тон изображения;

– цвет изображения (позволяет распознать особенности пойменного рельефа по оттенкам зеленого цвета, коренные берега русла – по оттенкам серого, коричневого, красного цветов, острова в русле – по зеленому цвету растительного покрова, осередки и побочни – по серо-желтым оттенкам песчаных и гравийных поверхностей и отсутствию растительности);

– структура изображения (характерный чешуйчатый рисунок поверхности дна реки под прозрачным слоем воды свидетельствует о наличии гряд и мезоформ).

Природным косвенным признаком может служить растительность на внутрирусловых образованиях. По характеру и степени ее развитости (или отсутствию) можно отличить русловой остров от осередка и оценить затопляемость морфологического образования.

Приведенные далее примеры демонстрируют простоту применения визуальной информации для экспертной оценки развития русел. При этом гидроморфологическое дешифрирование направлено на распознавание объектов разного структурного уровня – от протяженного морфологически однородного участка реки до подводных внутрирусловых образований, для этого ин-

[3] Методические указания УГМС. Вып. 71 / ГГИ / Применение материалов аэрофотосъемки для изучения русловых процессов и деформаций берегов водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1966.
[4] СП 493.1325800.2020. Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Общие требования. Издание официальное. М.: Минстрой РФ, 2020. 131 с.
[5] СТО ГУ ГГИ 08.29–2009. Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки. СПб: Нестор-История, 2009. 184 с. ISBN 978-59818-7393-5.

терактивные программы позволяют легко изменять масштаб изображения, создавая разную его генерализацию. Кроме того, наличие в таких программах снимков, выполненных за ряд последних лет, позволяет осуществить их сопоставление и даже проследить динамику плановых изменений речных русел.

Очевидно, что качество визуального дешифрирования определяется уровнем квалификации дешифровщика, его профессиональной эрудицией и интуицией, знанием и пониманием классификационных признаков гидроморфологических типов речных русел и типов руслового процесса.

Предлагаемая методика опирается на следующие постулаты гидроморфологической теории:

1. Сутью руслового процесса является транспорт руслоформирующих наносов, который в условиях динамического равновесия русла происходит в виде пространственно обособленных дискретных (целостных и неделимых) морфологических форм (микро- мезо- и макроформ) речного русла.

2. Все естественные деформации речных русел и пойм являются внешней формой проявления динамики этих дискретных морфологических элементов речных русел (форм движения руслоформирующих донных наносов).

3. Процессы руслоформирования, а следовательно, параметры и динамика морфологических элементов речного русла, развиваются в условиях воздействия ограничивающих факторов руслового процесса, что отражено в гидроморфологической типизации речных русел.

Начальным этапом методики оценки потенциальной опасности деформаций речного русла является оценка степени влияния ограничивающего фактора на переформирование русла на конкретном речном участке, т. е. идентификация исследуемого водотока с одним из выделенных типов речных русел по типизации, представленной в табл. 3, детальная версия которой опубликована в СП 493.1325800.2020. Тип и подтип русла устанавливаются по картам и космоснимкам непосредственно по прямым дешифровочным признакам и с использованием описаний из табл. 4.

Из табл. 3 следует, что переформирования всех русел I типа необратимы, не имеют циклического закономерного хода, т. е. состояние динамического равновесия им несвойственно. Можно утверждать, что они наиболее устойчивы в отношении плановых деформаций, т. к. подвержены значительному, а иногда и абсолютному воздействию ограничивающих условий.

В состоянии динамического равновесия находятся русла рек II и III типов, поэтому к ним применима классификация типов руслового процесса ГГИ [14].

Основой предлагаемой методики оценки степени опасности деформаций берегов является следующее распределение интенсивности деформаций:

– по морфологическим элементами речного русла (наибольшая интенсивность наблюдается в вогнутых берегах излучин, далее – в точках их перегиба, затем – на вогнутых берегах слабоизвилистых русел);

– с учетом генезиса размываемых берегов (коренные или пойменные);

– с учетом типа руслового процесса и гидроморфологического типа русла.

В связи с этим вторым этапом методики оценки опасности является установление типа руслового процесса на исследуемом участке по космиче-

Таблица 3. Гидроморфологическая типизация речных русел
Table 3. Hydro/morphological classification of river channels

Типы и их характеристики	Подтипы и их характеристики
I. Орографическое меженное русло (однорукавное или многорукавное). Склоны, долины и породы, заполняющие ее дно, определяют размеры и форму как паводочного, так и меженного русел реки	**Iа.** Дно и береговые склоны русла сложены трудноразмываемыми породами. Пойма отсутствует, русло орографическое (однорукавное или многорукавное). В русле происходят локальные необратимые деформации, обусловленные эрозионными процессами на склонах долины и механическим размывом берегов. Перемещение обломочного материала потоком происходит во взвешенном состоянии, а также в бесструктурной или грядовой форме с формированием аккумулятивных форм (пляжей и перекатов), плановое положение которых определяется конфигурацией русла
	Iб. Характеристики меженного русла реки определяются унаследованными крупнофракционными аллювиальными отложениями, сформированными древним потоком большой водности. Орографией этих отложений определяются плановые очертания слабо врезанного меженного русла. Деформации русла проявляются в перемещении отдельных фракций аллювия в бесструктурном виде с формированием аккумулятивных форм, плановое положение которых определяется конфигурацией русла. При этом все русловые переформирования локальны, необратимы и не являются проявлениями транспорта руслоформирующих наносов
	Iв. Участки русел с заболоченными поймами или заболоченными днищами долин. Это врезанные русла, пролегающие в торфяных массивах, залегающих на суглинках. Процессы болотообразования на регулярно затапливаемых территориях преобладают над процессами руслоформирования. Извилистость русла бессистемна и определяется локальной структурой болотного массива. Транспорт наносов (чаще песчаных) малоинтенсивен, осуществляется в бесструктурной и грядовой формах. Деформации берегов незначительны
II. Орографическое паводочное русло (узкая долина). Склоны долины определяют размеры и форму русла реки при высокой водности	**II.** Пойма реки отсутствует или развита незначительно и локально. В периоды половодий и паводков происходит активный транспорт руслоформирующих наносов в виде мезоформ паводочного русла реки, которые определяют размеры и форму меженного русла. Русловые процессы развиваются по ленточно-грядовому, побочневому, осередковому типам и по типу долинного блуждания на горных реках
III. Пойменные русла в собственных отложениях, с морфологической однородностью и циклическим развитием планово-стационарных пойменных массивов и с транспортом донных наносов в виде микроформ с развитием подводных морфологических элементов пойменных массивов (пляжей, кос, перекатов)	**IIIа.** Склоны долины оказывают ограничивающее влияние на поток и на формирование пойменных массивов при прохождении половодий и паводков. Транспорт руслоформирующих наносов осуществляется в виде микроформ и ленточных гряд с формированием подводных элементов пойменных массивов (пляжей, кос и перекатов). Процессы руслоформирования развиваются по типу ограниченного меандрирования и по типу русловой многорукавности
	IIIб. Склоны долины практически не оказывают влияния на плановое развитие излучин и формирование пойменных массивов (минимальное проявление ограничивающего фактора руслового процесса). Транспорт руслоформирующих наносов происходит в виде микроформ с формированием подводных элементов пойменных массивов (пляжей и перекатов). Процессы руслоформирования происходят по типу свободного и незавершенного меандрирования, а также пойменной многорукавности (равнинной и горной)

ским снимкам и топокартам на основе классификационных признаков всех типов руслового процесса, представленных в уточненной классификации СП 493.1325800.2020.

На третьем этапе оценки в первую очередь необходимо выполнить морфологическую классификацию прибрежных территорий (водоохранных зон) в соответствии с Методическими указаниями МПР[6], устанавливая при этом морфологическое положение размываемого участка берега:

– в пределах коренных склонов долины,
– в пределах пойменных массивов,
– в пределах унаследованных пойм,
– в качестве границы паводочного русла реки,
– в пределах паводочного русла реки.

Исходя из многолетнего опыта исследований, проводившихся в отделе русловых процессов ГГИ и позволяющих оценить на качественном уровне интенсивность плановых деформаций берегов для каждого типа русла и типа руслового процесса, установлена последовательность увеличения степени устойчивости размываемых берегов как меандрирующих русел с поймами, так и слабоизвилистых беспойменных русел, а также орографических. Наибольшая интенсивность размыва приурочена к вогнутым берегам:

– в вершинах излучин свободного и ограниченного меандрирования;
– в вершинах излучин незавершенного меандрирования и пойменной многорукавности;
– вблизи точек перегиба излучин любого типа меандрирования;
– наиболее устойчивыми берегами излучин меандрирующих русел являются берега с выходами в геологическом строении, устойчивыми к размыву пород, которые нарушают типовые схемы развития излучин;
– далее следуют берега беспойменных и паводочных русел рек;
– наиболее устойчивыми к размыву являются унаследованные и коренные берега орографических врезанных русел.

На рис. 2 представлены типовые участки русел в последовательности возрастания относительной устойчивости их размываемых берегов. А в табл. 4 эта последовательность (столбец 1) дополнена качественной оценкой степени потенциальной опасности размыва берегов (столбец 4).

Таким образом, весь диапазон интенсивности возможных плановых деформаций, включая наиболее устойчивые в плановом отношении русла I типа, разбит на 7 градаций и ранжирован по возрастанию природной устойчивости берегов с индексами от 1 до 7, а степень опасности плановых деформаций разбита на 6 градаций, как это показано в табл. 4. Полагаем, что представленная в таблице последовательность наиболее адекватно на качественном уровне отражает зависимость опасности деформаций от морфологических элементов речного русла, типа руслового процесса и гидроморфологического типа речного русла.

[6] Методические указания МПР по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части наблюдений за состоянием дна, берегов, состоянием и режимом использования водоохранных зон и изменениями морфометрических особенностей водных объектов или их частей, утвержденные приказом МПР № 432 от 8 октября 2014 г.

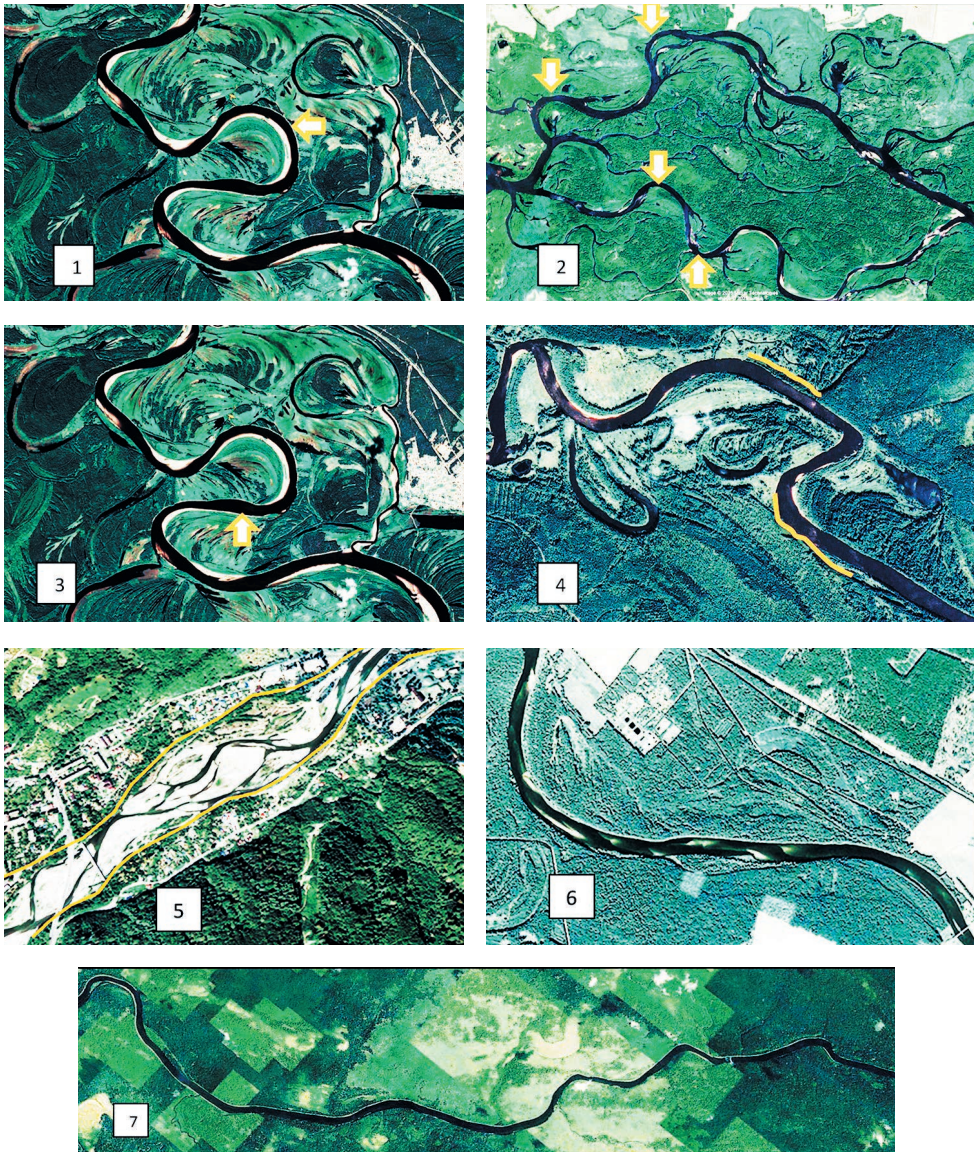


Рис. 2. Последовательность возрастания относительной устойчивости размываемых берегов русел: 1 – вогнутые берега в вершинах излучин свободного и ограниченного меандрирования; 2 – вогнутые берега в вершинах излучин незавершенного меандрирования и пойменной многорукавности; 3 – точки перегиба излучин любого типа меандрирования; 4 – выходы в вершинах излучин пород, устойчивых к размыву; 5 – берега паводочных русел рек; 6 – берега беспойменных русел рек; 7 – коренные берега орографических врезанных русел.

Fig. 2. The sequence of relative stability increasing of eroded riverbed shores: 1 – concave shores at the tops of bends of free and limited meandering; 2 – concave shores at the tops of bends of incomplete meandering and multi-armed floodplain; 3 – inflection points of bends of any type of meandering; 4 – exits at the tops of bends of erosion-resistant rocks; 5 – banks of flood riverbeds; 6 – banks of flood-free riverbeds; 7 – the root (non erodible) banks of the orographic embedded riverbeds.

Таблица 4. Гидроморфологическая типизация потенциальной опасности плановых деформаций
Table 4. Hydro/morphological classification of the hazard of horizontal deformations

Индекс интенсивности деформаций	Участки деформаций	Тип руслового процесса	Степень опасности деформаций
1	2	3	4
III_1	Пойменные вогнутые берега в вершинах излучин	Свободное и ограниченное меандрирование	Чрезвычайно опасная
III_2		Незавершенное меандрирование и пойменная многорукавность	Весьма опасная
III_3	Пойменные берега в точках перегиба излучин	Ограниченное, свободное и незавершенное меандрирование	Опасная
III_4	Выходы трудно размываемых пород на вогнутых берегах в вершинах излучин	Ограниченное, свободное* и незавершенное* меандрирование, русловая и горная пойменная многорукавность	Умеренно опасная
II_5	Коренные или унаследованные берега паводочного русла	Долинное блуждание, осередковый тип	
II_6		Побочневый и ленточно-грядовый типы	Малоопасная
I_7	Унаследованные и коренные берега орографических русел	Отсутствие типа РП, бесструктурный и структурный транспорт донных наносов	Неопасная

Примечание: * – типы русловых процессов с нарушенной типовой схемой деформаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе разработки методики определения опасности плановых деформаций речных русел были исследованы селитебные участки русел рек разных регионов России с разными физико-географическими характеристиками бассейнов и типов водного режима (бассейнов рек Северная Двина, Мезень, Печора, Амур, Кубань и рек черноморского побережья Кавказа) в рамках бюджетных исследований 2020–2023 гг. Всего по степени опасности плановых деформаций берегов в этой работе оценено около 250 участков 30 рек РФ (от малых до очень больших).

Анализ полученных результатов по всем обследованным территориям в пределах населенных пунктов выявил преобладание участков с активным проявлением ограничивающего фактора с соответствующей степенью опасности плановых деформаций (от умеренно опасной до неопасной). Причина такой статистики заключается в том, что, хотя генезис плановой устойчивости берегов рек на участках вблизи населенных пунктов различается в разных бассейнах, для поселений всегда выбираются наиболее безопасные участки рек, по возможности с устойчивыми в плане берегами.

Так, участки рек горно-предгорных районов с активным проявлением ограничивающего фактора составляют в бассейне Кубани 95 %, а в бассейне Амура – 80 %. Берега рек северных территорий, протекающих по древним эрозионным ложбинам стока в долинах, сформированных в периоды оледенений, имеют слоистое строение. В современных условиях трудно размываемые слои унаследованных отложений выступают ограничивающим фактором и сдерживают плановые деформации этих рек. Поэтому для рек Северная Двина, Мезень, Печора и их притоков селитебные участки с активным проявлением ограничивающего фактора также распространены достаточно широко и составляют соответственно 50 %, 71 % и 62 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье изложена методика экспресс-оценки потенциальной опасности плановых деформаций речных русел на селитебных территориях, разработанная на основе гидроморфологической типизации речных русел и дополненной и усовершенствованной типизации руслового процесса в рамках гидроморфологической теории ГГИ.

Предлагаемая методика основана на одном из важнейших постулатов гидроморфологической теории руслового процесса, гласящем, что все естественные деформации речных русел и пойм являются внешней формой проявления развития и движения в речном русле дискретных морфологических элементов речных русел (форм движения руслоформирующих донных наносов).

В основе предлагаемой методики лежит распределение интенсивности деформаций берегов по морфологическим элементам речного русла с учетом строения размываемых берегов, типа руслового процесса и гидроморфологического типа русла. При этом гидроморфологические типы речных русел и типы руслового процесса устанавливаются по топографическим картам и общедоступным космическим снимкам с использованием классификационных описаний, изложенных в актуальном СП 493.1325800.2020.

Предлагаемая методика всесторонне учитывает общие закономерности процессов руслоформирования, генезиса и развития дискретных морфологических элементов речных русел и форм транспорта руслоформирующих наносов, обусловливающих степень потенциальной опасности плановых деформаций речных русел, связанных с русловыми процессами. Она дает возможность оперативно и без значительных затрат оценивать направление и относительную интенсивность возможных деформаций речных берегов и, следовательно, составлять оценочные прогнозы их развития на качественном уровне. Такие качественные оценки потенциальной опасности деформаций берегов позволяют более обоснованно разрабатывать региональные программы ведения государственного мониторинга состояния дна и берегов водных объектов и планы развития селитебных территорий, включая процедуры выделения земельных участков под строительство на прибрежных территориях. Кроме того, данная методика позволяет оперативно учесть особенности морфологического строения речного русла в пределах селитебных территорий при установлении планового положения береговой линии и периодичности ее уточнения в соответствии с постановлением Правительства РФ от 29 апреля

2016 г. № 377 «Об утверждении Правил определения местоположения береговой линии (границы водного объекта), случаев и периодичности ее определения и о внесении изменений». Данное обстоятельство дает преимущество предлагаемой методике в сравнении с подходами, изложенными во введении.

К недостаткам методики можно отнести ее качественный характер. Поэтому в каждом конкретном случае при наличии установленных в ходе ведения мониторинга состояния дна и берегов водных объектов фактических скоростей плановых деформаций берегов оценку степени опасности деформаций следует проводить уже на основании СП 115.13330.2016.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение. М.: ГЕОС, 2000. 332 с. ISBN 5-89118-132-0.
2. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т.3: Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: Красанд. 2019. 640 с. ISBN 978-5-396-00976-9.
3. Assessing bank erosion potential using Rosgen's Bank Erosion Hazard Index (BEHI). URL: https://dep.wv.gov/WWE/getinvolved/sos/Documents/SOPs/BEHI-Overview.pdf.
4. Bhowmik M., Das N. Near bank stress ranking of Sonai Gang basin, West Tripura district // Proceedings of International Seminar on Environmental Perspectives and Resource Management, 19–20th December, 2014, Kolkata, India. P. 377–382.
5. Das N., Bhowmik M. Qualitative assessment of river bank erosion risk in Jirania rural development block, Tripura // Indian Journal of Applied Research. 2013. Vol. 3. Iss. 6. P. 274–276.
6. Mehdi H.M., Somaiyeh K., Milad R. Comparison of Stream Bank Erosion Hazard Methods Using NBS Model (Case Study: Galali River, Ghorveh) // Journal of Natural Environment Hazards. 2018. Vol. 6. No. 14. P. 141–152.
7. Newton S.E., Drenten D.M. Modifying the Bank Erosion Hazard Index (BEHI) protocol for rapid assessment of streambank erosion in Northeastern Ohio // Journal of Visualized Experiments. 2015. February. P. 1–14.
8. Rosgen D.L. Watershed assessment of river stability and sediment supply (WARSSS). Fort Collins, Colorado // Wildland Hydrology. 2006.
9. Coryat M. Analysis of the bank assessment for non-point source consequences of sediment (BANCS) approach for the prediction of streambank stability and erosion along Stony Clove Creak in the Catkills: MS Theses. Syracuse University, 2014. 87 p.
10. Rosgen D.L. A practical method of computing streambank erosion rate // Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference. 2001. Vol. 2. No. 2. Pp. 9–19.
11. Starr R. Maryland trust fund geomorphic monitoring. 2013. URL: https://dnr.maryland.gov/streams/Documents/2013TFTraining_BANCS_Davis.pdf.
12. Кудрицкий Д.М., Попов И.В., Романова Е.А. Основы гидрографического дешифрирования аэроснимков / под ред. А.П. Доманицкого. Л.: Гидрометеоиздат, 1956.
13. Попов И.В. Аэрофотосъемка и изучение вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1960.
14. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 272 с.

REFERENCES

1. Berkovich K.M., Chalov R.S., Chernov A.V. Ecological channel studies. M.: GEOS, 2000. 332 p. ISBN 5-89118-132-0. (In Russ.).
2. Chalov R.S. Channel studies: theory, geography, practice. Vol.3: Anthropogenic impacts, dangerous manifestations and management of channel processes. M.: Krasand. 2019. 640 p. ISBN 978-5-396-00976-9. (In Russ.).

3. Assessing bank erosion potential using Rosgen's Bank Erosion Hazard Index (BEHI). URL: https://dep.wv.gov/WWE/getinvolved/sos/Documents/SOPs/BEHI-Overview.pdf.
4. Bhowmik M., Das N. Near bank stress ranking of Sonai Gang basin, West Tripura district. *Proceedings of International Seminar on Environmental Perspectives and Resource Management*, 19–20th December, 2014, Kolkata, India. P. 377–382.
5. Das N., Bhowmik M. Qualitative assessment of river bank erosion risk in Jirania rural development block, Tripura. *Indian Journal of Applied Research*. 2013. Vol. 3. Issue 6. P. 274–276.
6. Mehdi H.M., Somaiyeh K., Milad R. Comparison of Stream Bank Erosion Hazard Methods Using NBS Model (Case Study: Galali River, Ghorveh). *Journal of Natural Environment Hazards*. 2018. Vol. 6. № 14. P. 141–152.
7. Newton S.E., Drenten D.M. Modifying the Bank Erosion Hazard Index (BEHI) protocol for rapid assessment of streambank erosion in Northeastern Ohio. *Journal of Visualized Experiments*. 2015. February. P. 1–14.
8. Rosgen D.L. Watershed assessment of river stability and sediment supply (WARSSS). Fort Collins, Colorado: *Wildland Hydrology*. 2006.
9. Coryat M. Analysis of the bank assessment for non-point source consequences of sediment (BANCS) approach for the prediction of streambank stability and erosion along Stony Clove Creak in the Catkills: MS Theses. Syracuse University, 2014. 87 p.
10. Rosgen D.L. A practical method of computing streambank erosion rate. *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*. 2001. Vol. 2. № 2. P. 9–19.
11. Starr R. Maryland trust fund geomorphic monitoring. 2013. URL: https://dnr.maryland.gov/streams/Documents/2013TFTraining_BANCS_Davis.pdf.
12. Kudritskiy D.M., Popov I.V., Romanova E.A. Fundamentals of hydrographic decoding of aerial photographs / edited by A.P. Domanitskiy, L.: Hydrometeoizdat, 1956. (In Russ.).
13. Popov I.V. Aerial photography and the study of land waters. L.: Hydrometeoizdat, 1960. (In Russ.).
14. Kondratiev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F., Fundamentals of the hydro/morphological theory of the channel process. L.: Hydrometeoizdat, 1982. 272 c. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Католиков Виктор Михайлович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом русловых процессов, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Россия, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23; ORCID: 0000-0003-3538-9450; e-mail: v.katolikov@mail.ru

Католикова Наталья Ивановна, старший научный сотрудник, отдел русловых процессов, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Россия, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23; ORCID: 0009-0007-3852-0684; e-mail: iamnik2@yandex.ru

Петровская Ольга Андреевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, отдел русловых процессов, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Россия, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23; ORCID: 0000-0002-3330-2430; e-mail: riverchannel@yandex.ru

About the authors:

Victor M. Katolikov, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Head of the Channel Processes Department, State Hydrological Institute, V.O. Second Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia; ORCID: 0000-0003-3538-9450; e-mail: v.katolikov@mail.ru

Nataliya I. Katolikova, Senior Researcher, Channel Processes Department, State Hydrological Institute, V.O. Second Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia; ORCID: 0009-0007-3852-0684; e-mail: iamnik2@yandex.ru

Olga A. Petrovskaya, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Channel Processes Department, State Hydrological Institute, V.O. Second Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia; ORCID: 0000-0002-3330-2430; e-mail: riverchannel@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 24.02.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 23.04.2025.
Принята к публикации / Accepted 30.05.2025.

УДК 556.555.8; 556.024; 556.18 https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-21-34

Особенности формирования качества воды Аргазинского водохранилища в периоды низких уровней

А.Ю. Орлова [1], А.В. Богомолов[2], А.И. Лучников[1,2], Ю.С. Ляхин[2], М.В. Антонова[3]

alena.orlova.rnvh@mail.ru

[1]*Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Камский филиал, г. Пермь, Россия*
[2]*Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия*
[3]*Западно-Уральский институт водных и экологических проблем, г. Пермь, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. На примере Аргазинского водохранилища рассмотрены экологические последствия снижения уровня водохранилища многолетнего регулирования, расположенного на территории горнопромышленного техногенеза. Особенностью водоема является наличие техногенных сульфидсодержащих донных отложений в зоне переменного подпора. Цели исследования – описание процессов, оказывающих влияние на качество воды, и оценка масштабов возможного загрязнения водохранилища в периоды его низких уровней. **Методы.** Исследование включает анализ данных дистанционного зондирования Земли, гидрологических и гидрографических условий, количественный химический анализ проб воды. **Результаты.** Установлено, что сработка водохранилища ниже 2,5 м от нормального подпорного уровня приводит к осушению техногенных донных отложений. В зоне осушки протекают процессы гипергенных преобразований сульфидсодержащих отложений, приводящие к выносу загрязняющих веществ в водоем. Основной поток загрязняющих веществ в водохранилище транспортирует сток р. Миасс, в связи с чем расход и содержание поллютантов в реке являются определяющими факторами загрязнения питьевого источника. Наиболее интенсивное поступление меди, цинка, марганца и железа в водоем наблюдается во время ливневых осадков при величине площади осушки техногенных отложений ~ 10 % от площади зеркала водоема. В данных условиях качество воды не соответствует санитарно-гигиеническим нормативам по железу и марганцу, содержание цинка и меди превышает фоновые значения от 2 до 40 раз.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Аргазинское водохранилище, низкий уровень водохранилища, качество воды, сульфидсодержащие донные отложения, объекты накопленного экологического вреда.

Для цитирования: Орлова А.Ю., Богомолов А.В., Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Антонова М.В. Особенности формирования качества воды Аргазинского водохранилища в периоды низких уровней // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 21–34. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-21-34, EDN: OTQQSR

© Орлова А.Ю., Богомолов А.В., Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Антонова М.В., 2025

Features of the formation of the Argazinsky reservoir water quality during the low-level periods

Alena Y. Orlova[1], Andrey V. Bogomolov[2], Anton I. Luchnikov[1,2], Yuriy S. Lyakhin[2], Maria V. Antonova[3]

alena.orlova.rnvh@mail.ru

[1]*Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, Perm, Russia*
[2]*Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*
[3]*West Ural Institute of Water and Environmental Problems, Perm, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The environmental consequences of a decrease in the level of a long-term regulation reservoir located in the mining technogenesis zone are considered using the Argazinsky reservoir as an example. A feature of the reservoir is the presence of technogenic sulphide-containing bottom sediments in the variable backwater zone. The purpose of the study is to describe the processes that affect water quality and assess the scale of possible reservoir pollution under low-level conditions. **Methods.** The study includes an analysis of Earth remote sensing data, hydrological and hydrographic conditions, and a study of water samples for quantitative chemical analysis. **Results.** It has been established that the drawdown of the reservoir below 2.5 m from the normal backwater level leads to the drying out of technogenic bottom sediments. In the drying zone, processes of hypergene transformations of sulphide-containing sediments occur, leading to the removal of pollutants into the reservoir. The main flow of pollutants into the reservoir is transported by the Miass River runoff, in connection with which the flow and content of pollutants in the river are one of the determining factors of pollution of the drinking water source. The most intensive entry of copper, zinc, manganese and iron into the reservoir is observed during heavy rainfall with the drying area of technogenic sediments of ~ 10% of the surface area. Under these conditions, the water quality does not meet the sanitary and hygienic standards for iron and manganese, the content of zinc and copper exceeds the background values from 2 to 40 times.

KEYWORDS: Argazinsky reservoir, low reservoir level, water quality, sulfide-containing bottom sediments, objects of accumulated environmental damage.

For citation: Orlova A.Y., Bogomolov A.V., Luchnikov A.I., Lyakhin Y.S., Antonova M.V. Features of the formation of the Argazinsky reservoir water quality during the low-level periods. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 3. P. 21–34. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-21-34, EDN: OTQQSR

ВВЕДЕНИЕ

Челябинская область является регионом с низким уровнем водообеспеченности [1], в связи с чем проблема сохранения качества водных ресурсов на данной территории особенно актуальна. Для обеспечения потребностей регионального центра на р. Миасс построены Аргазинское и Шершневское водохранилища. Аргазинское является верхним в каскаде, в нем сосредоточен основной объем воды для питьевых нужд г. Челябинска и городов-спутников (Копейска, Еманжелинска, Коркино и др.) с населением более 1 млн человек, а также для технического водоснабжения предприятий города. Основные характеристики Аргазинского

водохранилища[1]: отметка нормального подпорного уровня (НПУ) 275,32 м БС, отметка уровня мертвого объема (УМО) 266,62 м БС, площадь зеркала водохранилища при НПУ составляет 113 км^2, объем – 966,1 млн м^3 [2]. Ближайший действующий пост гидрологических наблюдений на р. Миасс расположен в 16 км выше Аргазинского водохранилища в д. Новоандреевке. Параметры р. Миасс в створе д. Новоандреевки: среднегодовой расход – 6,44 м^3/с, максимальный расход весеннего половодья – 63,6 м^3/с, минимальный 30-суточный расход летне-осенней межени – 2,52 м^3/с. Для покрытия дефицита водных ресурсов, возникающего в маловодные годы, построены сооружения по переброске части стока р. Уфы в Аргазинское водохранилище с пропускной способностью тракта до 4 м^3/с. Однако критерии начала переброски стока по тракту не установлены.

В пяти км от Аргазинского водохранилища расположен г. Карабаш. В результате добычи и переработки колчеданных руд в XX в. в Карабашском городском округе (КГО) образованы такие объекты накопленного вреда, как хвостохранилища, шлакоотвалы, шламовые поля. Деятельность медеплавильного комбината, в т. ч. сброс отходов обогатительной фабрики (сульфидсодержащих шламов) непосредственно в гидрологическую сеть, привела к чрезвычайному загрязнению территории КГО [2–4], что обусловливает поступление загрязняющих веществ в р. Миасс и водохранилище.

В р. Миасс при впадении в водохранилище в гидрохимическом пункте государственной сети наблюдений (ГСН), расположенном в 5,2 км восточнее г. Карабаш (рис. 1), фиксируется превышение рыбохозяйственных нормативов по цинку до 48 ПДК, по меди – до 40 ПДК и по марганцу – до 60 ПДК, что соответствует высокому (ВЗ) и экстремально высокому (ЭВЗ) уровням загрязнения[2].

В 2020 г. проблема поступления значительной доли загрязнений с территории КГО в Аргазинское водохранилище решена региональными властями за счет перехвата части поверхностного стока территории и устройства гидроботанической площадки для его очистки. В результате реализации мероприятия поступление загрязнений в водохранилище снижено на 11 тыс. т/год[3].

Однако часть сульфидсодержащих шламов, вынесенных поверхностными водами с загрязненной территории, аккумулирована в зоне переменного подпора Аргазинского водохранилища. Названные отложения представляют собой измельченный тонкозернистый материал с повышенным содержанием железа, меди, цинка, свинца, никеля, марганца, кадмия, мышьяка [3, 4].

В маловодные периоды водохранилище срабатывается на 3–6 м ниже НПУ. За период с 1988 по 2025 г. сработки водохранилища более 3 м происходили в маловодные 1996–1999 гг., 2010–2013 гг. и в 2021–2024 гг. Продолжительность

[1] Основные положения правил использования водных ресурсов Аргазинского и Шершневского водохранилищ на р. Миасс. М., 1966.

[2] Сайт Челябинского ЦГМС – филиала ФГБУ «Уральское УГМС»: http://www.chelpogoda.ru (дата обращения: 01.02.2025).

[3] Годовой отчет о ходе реализации и оценке эффективности государственной программы Челябинской области «Охрана окружающей среды Челябинской области» на 2018–2025 годы». Утв. приказом Министерства экологии Челябинской области от 21.04.2020. 106 с.

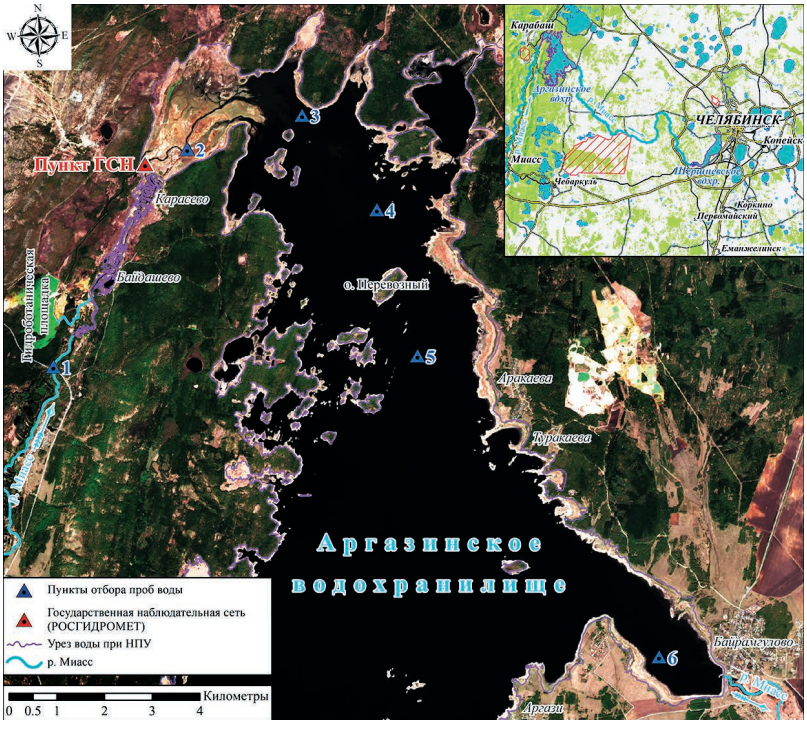


Рис. 1. Схема расположения участка обследования.
Fig. 1. Layout of the survey area.

периода с пониженным уровнем составляет 2–4 года, периодичность возникновения – порядка 10 лет. Прогноз изменения водности р. Миасс в створе поста д. Новоандреевки, выполненный Е.Д. Кошелевой и А.Т. Зиновьевым [5], показывает отрицательный тренд. Таким образом, с учетом глобальных климатических изменений в будущем возможно увеличение продолжительности и частоты периодов с пониженным уровнем водохранилища.

Вопрос изменения качества воды при снижении уровней водохранилищ рассмотрен в ряде работ [6–9], в которых показано, что при падении уровня водоемов возможно ухудшение качества воды за счет уменьшения кратности разбавления. Ситуация на Аргазинском водохранилище осложняется наличием объектов накопленного экологического вреда на водосборе и техногенных донных отложений в верховье водоема.

В связи с тем, что водохранилище является питьевым источником, важно поддержание качества воды в нем на уровне санитарно-гигиенических нормативов, в т. ч. и в маловодные периоды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период пониженного уровня воды в 2022–2023 гг. выполнено натурное обследование состояния зоны осушки в верховье водохранилища. Проведен отбор проб воды в р. Миасс и Аргазинском водохранилище на химический анализ (рис. 1), в т. ч. в двух пунктах на р. Миасс: условно фоновая проба в пункте, расположенном выше зоны влияния объектов накопленного вреда КГО (№ 1), и в зоне осушки техногенных грунтов (№ 2); в четырех пунктах Арга-

зинского водохранилища, расположенных вдоль основного транзита водной массы (№ 3–6). Ввиду специфики формирующегося загрязнения отобранные пробы воды анализировали на валовое содержание следующих компонентов: медь, цинк, марганец и железо общее. Пробы воды исследованы в аккредитованной лаборатории по утвержденным методикам ПНДФ 14.1:2:4.135-98 и ПНДФ 14.1:2:253-09. Расходы р. Миасс приняты по данным гидрологического поста ГСН в д. Новоандреевке.

Построение профилей и расчет площадей зоны осушки при различных уровнях наполнения выполнены в геоинформационной системе ArcGIS с использованием цифровой модели рельефа дна (ЦМР) водохранилища, составленной по результатам полевого обследования. Величина рассчитанной площади осушки верифицирована по данным ДЗЗ – космическим снимкам Sentinel-2 с разрешением 10 м, находящимся в открытом доступе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В более ранних исследованиях [10] показано, что при наполненности Аргазинского водохранилища более 80 % (при уровне воды 273,14 м БС) качество воды соответствовало фоновым значениям р. Миасс. Наибольшие концентрации загрязняющих веществ на уровне ВЗ и ЭВЗ по марганцу, меди, цинку фиксировались на входе в водохранилище на расстоянии не далее 1,2 км от поста ГСН.

По результатам химического анализа проб воды р. Миасс и Аргазинского водохранилища, выполненного в безледоставный период 2022–2023 гг. при наполненности водохранилища менее 80 %, выявлен рост содержания меди, цинка, марганца, железа общего в верховье водохранилища и в р. Миасс (в зоне осушки) от 2 до 40 раз по сравнению с фоновым створом (табл. 1), превышение санитарно-гигиенических нормативов наблюдалось по железу в 1,5–2,3 раза и марганцу в 2–12 раз[4,5]. Верхние границы концентраций загрязняющих веществ зафиксированы во время ливневых осадков и при повышенных расходах р. Миасс.

Четко прослеживается неравномерность распределения загрязняющих веществ по длине водохранилища. Максимальное содержание поллютантов наблюдалось в р. Миасс в зоне осушки (пункт 2) и в верховье водохранилища на расстоянии около 10 км от ГСН (пункты 3, 4). Следует отметить, что содержание цинка и меди в наиболее удаленном от источника загрязнения створе (пункт 6) в 2023 г. было на порядок выше, чем в 2022 г. На рис. 2 на примере соединений цинка представлен характерный тип распределения загрязняющих веществ по длине водохранилища в периоды его пониженных уровней.

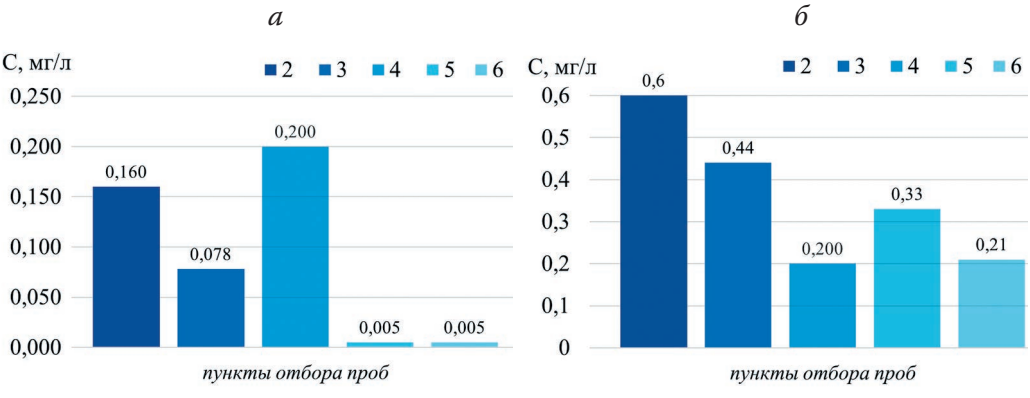
Ухудшение качества воды в условиях пониженных уровней водохранилища обусловлено рядом факторов. Техногенные грунты, депонированные в зоне выклинивания подпора, при наполненном водохранилище полностью затоплены. При этом поступление поллютантов в воду из донных отложений происходит за счет диффузионных процессов сорбции-десорбции на границе двух фаз [11], а также периодического поступления частиц грунта в толщу воды при ветро-волновом взмучивании [12].

[4] Отчет о наблюдениях за состоянием дна, берегов и изменением морфометрических особенностей Аргазинского водохранилища. Пермь: ООО «ЗУИВЭП», 2022. 80 с.

[5] Отчет о наблюдениях за состоянием дна, берегов и изменением морфометрических особенностей Аргазинского водохранилища. Пермь: ООО «ЗУИВЭП», 2023. 70 с.

Таблица 1. Содержание поллютантов в среднем горизонте Аргазинского водохранилища и р. Миасс (min-max), мг/дм^3 по данным[4,5]
Table 1. Content of pollutants in the middle horizon of the Argazinsky reservoir and the Miass River (min-max), mg/dm^3 according to the data[4,5]

Период	1 рМ, фон	2022 г. (~ 271,7 м БС)					2023 г. (ниже 270 м БС)				
Створ		2 рМ, зона осушки	3 (АВ)	4 (АВ)	5 (АВ)	6 (АВ)	2 рМ, зона осушки	3 (АВ)	4 (АВ)	5 (АВ)	6 (АВ)
Цинк	0,005–0,082	0,16–0,18	0,078–0,109	0,005–0,2	0,005–0,005	0,005–0,005	0,06–0,2	0,012–0,24	0,01–0,37	0,0057–0,062	0,005–0,07
Медь	0,001–0,015	0,038–0,045	0,026–0,034	0,009–0,07	0,0015–0,014	0,0013–0,006	0,013–0,081	0,0078–0,082	0,003–0,112	0,001–0,034	0,001–0,048
Марганец	0,02–0,22	0,27	0,31–0,6	0,113–1,26	0,103–0,17	0,056–0,099	0,48–0,6	0,122–0,44	0,126–0,54	0,121–0,33	0,0065–0,21
Железо общ.	0,08–0,319	0,379–0,509	0,195–0,439	0,19–0,212	0,124–0,287	0,155–0,414	0,093–0,69	0,088–0,512	0,208–0,43	0,05–0,183	0,075–0,386



июль 2022 г., ~ 272 м БС по данным[4] август 2023 г., ~ 270 м БС по данным[5]

Рис. 2. Распределение содержания цинка по длине Аргазинского водохранилища.
Fig. 2. Distribution of zinc content along the length of the Argazinsky reservoir.

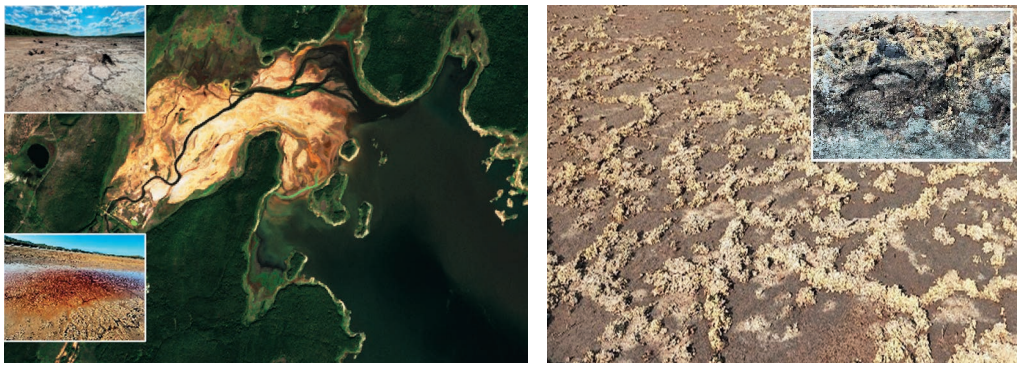
В маловодные периоды при сработке уровня водохранилища в зоне переменного подпора восстанавливаются речные условия, техногенные сульфидсодержащие грунты выходят из аквальных условий и в зоне осушки водохранилища наблюдается «оголение» донных отложений (рис. 3*а*). Сульфидсодержащие донные отложения в зоне осушки подвергаются гипергенным преобразованиям, в т. ч. эоловому переносу, водной эрозии и процессам окисления.

В работах [3, 4] показано, что шламовые отложения в г. Карабаше при плюсовых температурах и наличии влаги активно окисляются с участием бактерий,

в результате чего образуются сульфаты металлов и серная кислота. Сотрудниками Института минералогии УрО РАН описано формирование вторичных минеральных образований (вторичных сульфатов) на испарительном барьере на поверхности сульфидсодержащих отложений. Вторичные сульфаты являются неустойчивыми фазами и в период ливневых дождей за короткий промежуток времени способны переходить в растворенное состояние, поставляя в речную сеть соединения железа, меди, цинка и сульфат-иона [3]. Формирование вторичных сульфатов в зоне осушки Аргазинского водохранилища в 2023 г. показано на рис. 3*б*.

Распространение загрязняющих веществ по площади водохранилища за счет пыления оголенных отложений (рис. 4) и размыва осадками (рис. 5) продемонстрировано на космических снимках.

а *б*



космоснимок, сентябрь 2023 г. вторичные сульфаты, май 2023 г.

Рис. 3. Зона осушки верховьев Аргазинского водохранилища в 2023 г.
Fig. 2. Drying zone of the upper reaches of the Argazinsky reservoir in 2023:
a) space image, September 2023; *b*) secondary sulfates, May 2023.

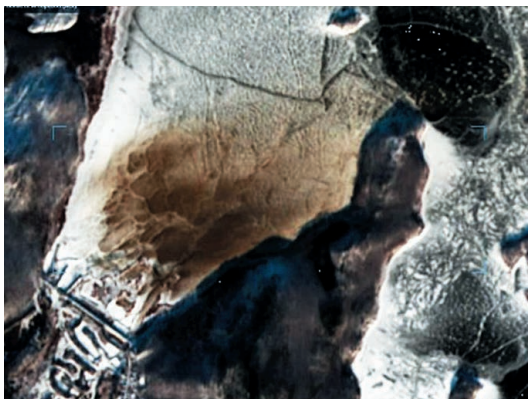


Рис. 4. Аэрогенный перенос частиц оголенного грунта, снимок от 28.11.2021.
Fig. 4. Airborne transfer of exposed soil particles, 11/28/2021.

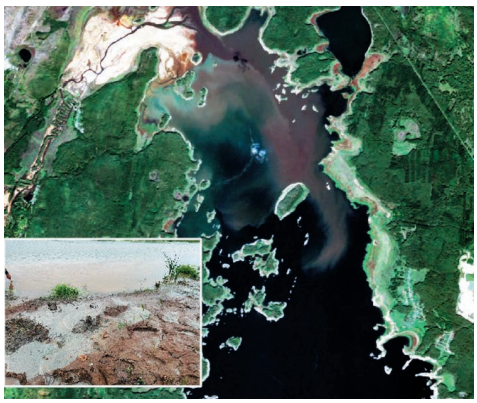


Рис. 5. Вынос загрязняющих веществ р. Миасс в Аргазинское водохранилище, снимок от 14.09.2023.
Fig. 5. Removal of pollutants by the Miass River into the Argazinsky Reservoir, 09/14/2023.

Загрязнению водохранилища аэрогенным путем способствуют западные и северо-западные ветры, преобладающие на данной территории.

Определяющими параметрами в формировании концентраций загрязняющих примесей в дождевом стоке являются слой осадков и продолжительность предшествующего сухого периода, а величина потока поллютантов в водохранилище будет зависеть в основном от интенсивности осадков и площади осушки техногенных грунтов [13].

С использованием ЦМР дна построена кривая зависимости площади осушки техногенных грунтов от уровней воды Аргазинского водохранилища (рис. 6). Площадь осушки также можно определить по данным ДЗЗ, однако этот метод имеет ограничения по качеству и частоте снимков. Построенная кривая позволяет определить площадь осушки при любом заданном уровне водохранилища. В августе 2023 г., например, при уровне 269,6 м БС площадь «оголения» сульфидсодержащих отложений была ~ 11,6 км^2, что составляет около 10 % от площади зеркала водохранилища.

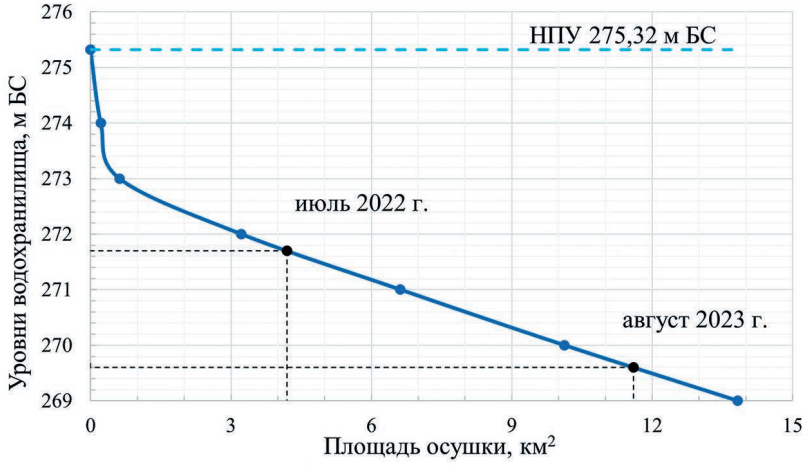


Рис. 6. Кривая зависимости площади осушки техногенных грунтов от уровней воды Аргазинского водохранилища.
Fig. 6. Curve of dependence of the drying area of technogenic soils on the water levels of the Argazinsky reservoir.

Анализ зависимости на рис. 6 показывает, что значительное увеличение площади осушки сульфидсодержащих отложений начинается с уровня ~ 272,8–273,0 м БС, что на 2,3–2,5 м ниже НПУ.

Таким образом, при сработке водохранилища ниже 273 м БС создаются условия для повышенного поступления загрязняющих веществ в р. Миасс и далее в Аргазинское водохранилище за счет более интенсивных процессов конвективного массопереноса в зоне осушки техногенных грунтов (ливневыми осадками и стоком р. Миасс) по отношению к десорбции поллютантов из донных отложений посредством диффузии в аквальных условиях (в случае отсутствия активных динамических явлений на водоеме).

Сток р. Миасс, осуществляющий транзит поллютантов из зоны осушки, вероятно, является доминирующим фактором, влияющим на качество воды питьевого источника. На представленном ранее космоснимке (рис. 5) хорошо визуализируется распространение шлейфа загрязняющих веществ, поступающих с потоком р. Миасс, в условиях пониженного уровня водоема.

Параметры зоны распространения загрязненного шлейфа в водохранилище будут зависеть от расходов р. Миасс. В табл. 2 представлено содержание поллютантов в пункте 4 водохранилища при разных расходах р. Миасс. Увеличение содержания меди, цинка, марганца и взвешенных веществ в водохранилище прослеживалось при росте расхода реки.

Таблица 2. Содержание поллютантов в воде Аргазинского водохранилища (пункт 4, средний горизонт) в условиях пониженных уровней по данным[4,5]
Table 2. Content of pollutants in the water of the Argazinsky reservoir (point 4, middle horizon) under conditions of low levels[4,5]

Содержание поллютантов, мг/дм³	Расход р. Миасс, м³/с		
	менее 3,0	6,1	22,0
Взвешенные вещества	0,86	4,6	14,5
Медь	0,02	0,07	0,11
Цинк	0,03	0,20	0,37
Марганец	0,34	1,26	0,54

Следует отметить, что на распространение загрязняющих веществ по длине водохранилища также оказывают воздействие особенности гидрографии дна водохранилища и форма ложа. В верхней части водоема расположены две группы островов: первая – около 4 км от входного створа, вторая (у о. Перевозный) – на расстоянии порядка 10 км от входного створа, выполняющие роль механических барьеров, где в результате уменьшения скоростей течения происходит осаждение наносов. В частности, в работе [14] около первой группы описано локальное увеличение мощности донных отложений. А ниже второй группы островов (пункт 5) в 2022 г. наблюдалось резкое снижение содержания поллютантов в воде (рис. 2*а*).

На карте распределения глубин (рис. 7) и поперечных профилях (рис. 8) по линии второй группы островов видно, что в периоды пониженных уровней на участке выше о. Перевозный формируется обособленная часть акватории, поток воды и загрязняющих веществ из которой осуществляется по зауженным протокам шириной 500–600 м между островами и левым берегом. Суммарная площадь живого сечения при этом снижается в 2,5 раза по сравнению с условиями, когда водохранилище наполнено до отметки 273 м БС, составляя 0,004 км² и 0,01 км² соответственно.

При сработке водохранилища до УМО барьерная функция островов будет утрачена в связи с восстановлением на всей северной части водохранилища речных условий, загрязненный сток р. Миасс будет напрямую поступать в озерный участок водохранилища.

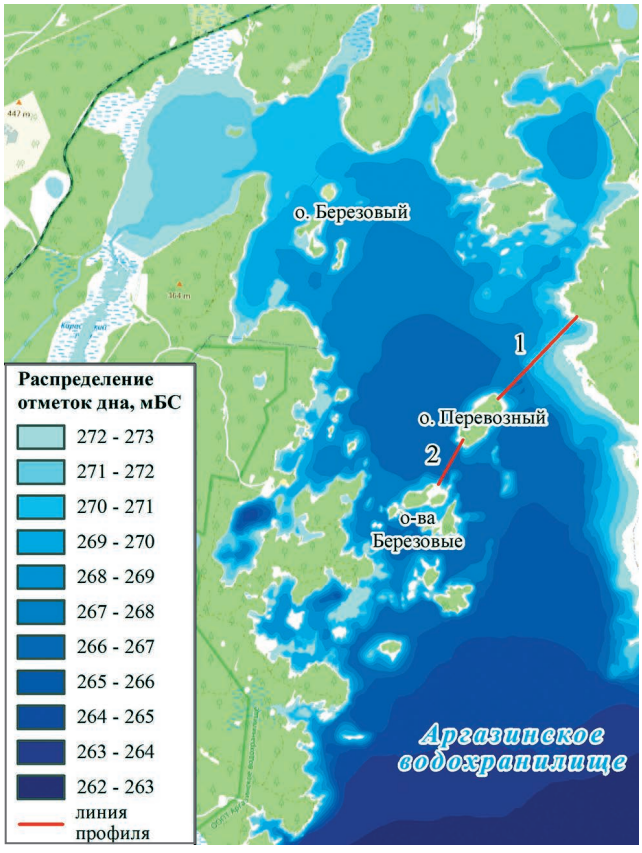


Рис. 7. Картосхема распределения глубин северной части Аргазинского водохранилища.
Fig. 7. Schematic map of distribution of depths of the northern part of the Argazinsky reservoir.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аргазинское водохранилище является источником питьевого водоснабжения крупной агломерации с населением более 1 млн человек. Особенность водохранилища – наличие в зоне переменного подпора техногенных сульфидсодержащих донных отложений, состоящих из отходов переработки колчеданных руд.

По результатам обследования состояния водохранилища в маловодный период 2022–2023 гг. показано, что в период сработки водохранилища на 3–6 м ниже НПУ качество воды водоема снижается. В данный период наблюдается рост содержания меди, цинка, марганца, железа общего в верховье водохранилища от 2 до 40 раз по сравнению с фоновым створом и превышение санитарно-гигиенических нормативов по железу в 1,5–2,3 раза, по марганцу – в 2–12 раз.

Основной причиной снижения качества воды является выход из аквальных условий техногенных сульфидсодержащих отложений, площадь которых достигает порядка 10 % зеркала водоема. При обнажении сульфидсодержащих отложений интенсифицируются процессы выщелачивания поллютантов за счет окисления сульфидов металлов, образования хорошо растворимых вторичных сульфатов. Транспорт загрязняющих веществ в питьевой источник

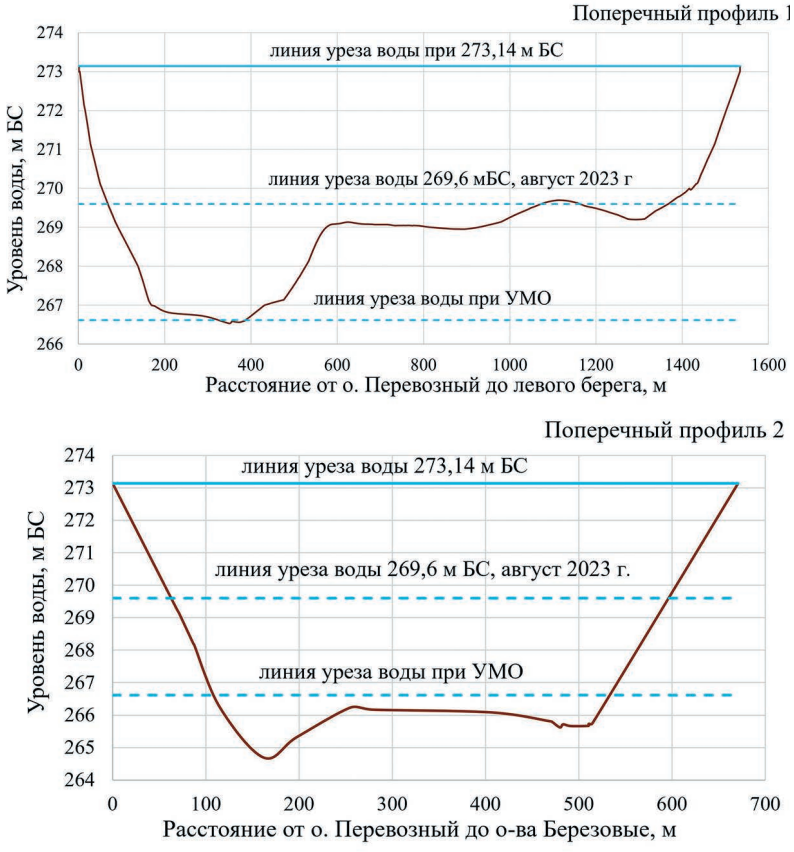


Рис. 8. Поперечные профили водохранилища в районе расположения группы островов у о. Перевозный.

Fig. 8. Cross-sections of the reservoir in the area of the group of islands near Perevozny Island.

осуществляется р. Миасс, а также за счет процессов водной и ветровой эрозии в зоне осушки. На распространение загрязняющих веществ по длине водоема оказывает сдерживающее влияние рельеф дна верхней части водохранилища.

Наихудший сценарий для качества воды водохранилища возможен при сочетании гидрологических (сработке водохранилища ниже 270,0 м БМС, расходах р. Миасс на уровне среднемноголетних и выше) и метеорологических факторов (ливневых осадков и ветров западного направления). Подобные условия наблюдались на водохранилище в 2023 г.

Исследования дают основу для понимания характера и масштабов возможного загрязнения водоема при сочетании различных условий и могут быть использованы для планирования реабилитационных мероприятий на данной территории.

Описанные процессы важно учитывать при определении графиков регулирования Аргазинского водохранилища и режимов его работы, а также при разработке критериев начала переброски стока р. Уфы в целях пополнения запасов Аргазинского водохранилища в маловодные периоды. Критерии переброски должны учитывать не только своевременное пополнение объема водных ресурсов, но и их качество.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никаноров В.А., Косолапов А.Е. Оценка водообеспеченности и нагрузки на поверхностные водные ресурсы регионов Российской Федерации / В.А. Никаноров, А.Е. Косолапов // Мат-лы Всеросс. научно-практ. конф. «Водные ресурсы России: современное состояние и управление», г. Сочи, 8–14 октября 2018 г. В 2 т. Т. 1. Сочи: ООО «Лик», 2018. С. 4–11.
2. Таций Ю.Г. Эколого-геохимическая оценка загрязнения окружающей среды в зоне действия Карабашского медеплавильного комбината // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2012. № 12. С. 90–96.
3. Удачин В.Н., Аминов П.Г., Филиппова К.А. Геохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 252 с.
4. Сборник материалов по проблеме загрязнения Аргазинского водохранилища водотоками Карабашского промышленного узла / Министерство радиационной и экологической безопасности Челябинской области, ЮУрГУ. Челябинск: Магнитогорский дом печати, 2011. 116 с.
5. Кошелева Е.Д., Зиновьев А.Т. Анализ изменения водности рек Обь-Иртышского бассейна в условиях изменения климата // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2017. № 3 (46). С. 80–86.
6. Салов Г.В. Особенности эксплуатации Краснодарского водохранилища при сниженном нормальном подпорном уровне // Мат-лы Всеросс. научно-практ. конф. «Водные ресурсы России: современное состояние и управление», г. Сочи, 8–14 октября 2018 г. В 2 т. Т. 1. Сочи: ООО «Лик», 2018. С. 190–197.
7. Wang Z., Wang T., Liu X., Hu S., Ma L., Sun X. Water Level Decline in a Reservoir: Implications for Water Quality Variation and Pollution Source Identification // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020, 17, 2400. ISSN 1660-4601.
8. Латыпова В.З. Уровенный режим Куйбышевского водохранилища: экологические и экономические аспекты // Журнал экологии и промышленной безопасности. 2012. № 2 (54). С. 11–14.
9. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Малые водохранилища: экология и безопасность. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2012. 256 с.
10. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Белобородов А.В., Тиунов А.А. К вопросу оценки качества воды Аргазинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 1. С. 6–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-23.
11. Вениционов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах / под науч. ред. А.М. Черняева; КамНИИВХ. Екатеринбург: Изд-во РосНИИВХ, 2002. 236 с.
12. Ding W., Wu T., Qin B., Lin Y., Wang H. Features and impacts of currents and waves on sediment resuspension in a large shallow lake in China // Environmental science and pollution research international. 2018, Dec; 25 (36): 36341-36354.
13. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения: коллективная монография / под рук. В.И. Данилова-Даниляна. М.: РАН, 2020. 512 с.
14. Белобородов А.В., Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С. Опыт применения гидроакустического профилографа для оценки мощности донных отложений крупного водохранилища (на примере Аргазинского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 3. С. 6–18. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-3-6-18.

REFERENCES

1. Nikanorov V.A., Kosolapov A.Y. Assessment of water availability and load on surface water resources of the Russian Federation. Water resources of Russia: current state and management: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference. 2018. P. 4–11 (In Russ.).

2. Tatsiy Yu.G. Ecological and geochemical evaluation of environmental pollution within the operating area of the Karabash copper-smelting plant. *Tyumen State University Herald*. 2012. 12. 81–86. ISSN 2411-7927.
3. Udachin V.N., Aminov P.G., Filippova K.A. Geochemistry of mining technogenesis of the Southern Urals. Ekaterinburg, 2014. 252 p. (In Russ.).
4. Collection of materials on the problem of pollution of the Argazinskoye reservoir by watercourses of the Karabash industrial hub. Ministry of Radiation and Environmental Safety of the Chelyabinsk Region, Chelyabinsk, 2011. 116 p. (In Russ.).
5. Kosheleva E.D., Zinoviev A.T. Analysis of changes in the water change of the Ob-Irtysh basin river for the causer of climate change. *Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society*. 2017. 3 (46). 80–86. ISSN 2410-1192 (In Russ.).
6. Salov G.V. Features of the operation of the Krasnodar reservoir with a reduced normal backwater level. Water resources of Russia: current state and management: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference, 2018. 190–197 (In Russ.).
7. Wang Z., Wang T., Liu X., Hu S., Ma L., Sun X. Water Level Decline in a Reservoir: Implications for Water Quality Variation and Pollution Source Identification. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2020. 17. 2400. ISSN 1660-4601.
8. Latypova V.Z. Leveled conditions of the Kuibyshev reservoir: ecological and economic aspects. *Journal of Ecology and Industrial Safety*. 2012. 2 (54). P. 11–14. ISSN: 2079-911X (In Russ.).
9. Maksimovich N.G., Pyankov S.V. The small reservoir: ecology and safety. Perm, 2012. 256 p. (In Russ.).
10. Bogomolov A.V., Lepikhin A.P., Lyakhin Yu.S., Beloborodov A.V., Tiunov A.A. Assessment of water quality of the Argazin reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. 1. P. 6–23 (In Russ.).
11. Venitsianov E.V., Lepikhin A.P. Physical/chemical basis for modeling the migration and transformation of heavy metals in natural waters. Ekaterinburg, 2002. 235 p. (In Russ.).
12. Ding W., Wu T., Qin B., Lin Y., Wang H. Features and impacts of currents and waves on sediment re-suspension in a large shallow lake in China. *Environmental science and pollution research international.* 2018, Dec; 25 (36): 36341-36354. ISSN 0944-1344.
13. Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions. Collective monograph under the supervision of V.I. Danilov-Danilyan. Moscow, 2020. 512 p. (In Russ.).
14. Beloborodov A.V., Bogomolov A.V., Lepikhin A.P., Lyakhin Yu.S. Experience of application of hydroacoustic profilograph for estimation of bottom sediments of large reservoirs (the Argazin reservoir as a study case). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020. 3. P. 6–18 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Орлова Алена Юрьевна, канд. хим. наук, научный сотрудник, Камский филиал ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ORCID: 0009-0009-5954-409X; e-mail: alena.orlova.rnvh@mail.ru

Богомолов Андрей Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0003-0626-4069; e-mail: whitewing85@mail.ru

Лучников Антон Игоревич, научный сотрудник, Камский филиал ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ведущий инженер, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0002-0660-2462; e-mail: luchnikovanton@gmail.com

Ляхин Юрий Сергеевич, канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0001-8058-5587; e-mail: ljahin85@mail.ru

Антонова Мария Вячеславовна, инженер-картограф, ООО «Западно-Уральский институт водных и экологических проблем», Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; e-mail: ghosttin@mail.ru

About the authors:

Alena Y. Orlova, Candidate of Chemical Sciences, Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 113, Perm, 614002, Russia; ORCID: 0009-0009-5954-409X; e-mail: alena.orlova.rnvh@mail.ru

Andrey V. Bogomolov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0003-0626-4069; e-mail: whitewing85@mail.ru

Anton I. Luchnikov, Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 113, Perm, 614002, Russia; Leading Engineer, Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0002-0660-2462; e-mail: luchnikovanton@gmail.com

Yuriy S. Lyakhin, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0001-8058-5587; e-mail: ljahin85@mail.ru

Maria V. Antonova, Plotter Engineer, West Ural Institute of Water and Environmental Problems, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 113, Perm, 614002, Russia; e-mail: ghosttin@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 11.03.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 27.03.2025.
Принята к публикации / Accepted 30.05.2025.

УДК 556.535.2 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-35-49*

Динамика наводнений на реке Оби в черте города Барнаула

С.Ю. Самойлова ✉, **В.А. Казанцева**

✉ bastet@iwep.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность работы обусловлена увеличением материального ущерба, связанного с наводнениями при половодьях и дождевых паводках на р. Оби, которые наблюдаются регулярно. Отдельные районы г. Барнаула подвержены затоплениям даже при максимальных уровнях воды, близких к среднемноголетним. Статистический и историко-географический анализ наводнений за период наблюдений дает представление об изменении их повторяемости, генезиса, класса опасности под влиянием климатических изменений. **Методы.** Комплексный историко-географический и статистический анализ наводнений на р. Оби за период инструментальных наблюдений (1894–2020 гг.): их генезиса, вероятности превышения и силы воздействия. Для анализа тенденций, связанных с влиянием изменений климата, выполнен комплексный статистический анализ максимальных уровней воды (как основной характеристики наводнений). Он включает: анализ однородности гидрологических рядов; расчет ординат и построение кривых обеспеченности в условиях нестационарности; анализ частоты возникновения наводнений разной обеспеченности и генезиса до начала климатических изменений (1976 г.) и в современный период. **Результаты.** За период с 1894 по 2020 г. наблюдается общее снижение максимальных уровней воды. Тренд статистически значим на уровне 1 %. Это связано с перераспределением стока внутри года в результате климатических изменений: ростом зимнего меженного стока и уменьшением талой составляющей в стоке половодья. Установлено, что с началом климатических изменений частота наводнений снизилась вдвое, а наводнение обеспеченностью ниже 10 % наблюдалось только однажды, в результате дождевого паводка в 2014 г. Более половины наводнений в черте г. Барнаула происходит от снеготаяния в период половодья, однако после 1976 г. доля таких наводнений уменьшилась. В то же время вдвое выросла доля быстроразвивающихся наводнений вследствие дождевых паводков.

Ключевые слова: Обь, Барнаул, максимальный уровень воды, статистический анализ, половодье, паводок, затор, наводнение, обеспеченность, климатические изменения.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00157, https://rscf.ru/project/24-27-00157/.

Для цитирования: Самойлова С.Ю., Казанцева В.А. Динамика наводнений на реке Оби в черте города Барнаула // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 35–49. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-35-49, EDN: SGQHKD

Flood dynamics on the Ob River at the city of Barnaul

Svetlana Y. Samoilova ✉, **Vasilina A. Kazantseva**

✉ bastet@iwep.ru

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

© Самойлова С.Ю., Казанцева В.А., 2025

ABSTRACT

Relevance. The growing economic damage from floods during high water and rainfalls makes the study topical. Inundation on the Ob River occurs regularly. Some districts of Barnaul are prone to it even at maximum water levels close to the average long-term ones. The statistical and historical-geographical analysis of floods over the observation period gives an idea of changes in their recurrence, genesis, and hazard class influenced by climate change. **Methods.** The comprehensive historical, geographical and statistical analysis of floods on the Ob, i. e. their genesis, exceedance probability, and impact strength for the period of instrumental observations (1894–2020) was used. To analyze the trends related to climate change effects, we performed a comprehensive statistical analysis of maximum water levels (as the main characteristics of floods). It included the study of hydrological series homogeneity; the calculation of ordinates and construction of flood probability curves in conditions of instability; the analysis of the frequency of floods with different exceedance probability and genesis before the onset of climate change (1976) and today. **Results.** During the observation period of 1894–2020, a general decline in maximum water levels was noted. The trend was statistically significant at the 1 % level due to intra-annual runoff redistribution because of climatic changes (an increase in winter low flow and a decrease in the snowmelt component of flood). It was found that with the beginning of climate change, the snowmelt floods' frequency dropped by half; inundation with probability of exceeding the hydrological values less than 10 % was recorded only once and caused by rainfalls in 2014. In the high-water period, snowmelt provided more than half of cases of Barnaul inundations. However, the proportion of such floods reduced after 1976. At the same time, the share of rapidly developing floods induced by rainfalls has doubled.

Keywords: Ob River, Barnaul, maximum water level, statistical analysis, snowmelt flood, flood, ice dam, inundation, probability of exceeding the hydrological values, climatic changes.

For citation: Samoilova S.Y., Kazantseva V.A. Flood dynamics on the Ob River at the city of Barnaul. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 4. P. 35–49. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-35-49, EDN: SGQHKD

ВВЕДЕНИЕ

По данным Росгидромета, с начала 1990-х годов наблюдается увеличение стихийных бедствий, сопровождающихся материальным ущербом, из-за половодий и дождевых паводков, причем доля последних растет[1]. Крупнейшие наводнения XXI в. в результате быстроразвивающихся дождевых паводков произошли в бассейнах рек Адагум (2012 г.) [1], Амур (2013 г.) [2], Ангара (2019 г.) [3]. В результате дождевого паводка в 2014 г. на ряде рек бассейна Верхней Оби сформировался наивысший за весь период наблюдений расход воды [4, 5]. В 2024 г. произошло наводнение в бассейне р. Урал, в результате которого пострадали Оренбургская, Курганская и ряд других областей России и Республики Казахстан. Это наводнение имело другой генезис и было сформировано преимущественно талыми водами. Причиной стало сочетание следующих факторов: низкой инфильтрационной способности почвогрунтов (из-за их переувлажнения и глубокого промерзания), значительных снегозапасов и «дружной» весны [6]. Антропогенный фактор – освоение пойм, строительство дорог, мостовых переходов с малой пропускной способностью – увеличивает

[1] Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2022. 676 с.

масштабы опасных явлений в результате половодий и дождевых паводков и усугубляет их последствия [1, 7].

В связи с изменением климата ожидается дальнейший рост ущерба от наводнений, в т. ч. из-за увеличения годового стока рек, роста экстремальных осадков и роста снегозапасов при холодных зимах [8].

Целью настоящего исследования является анализ динамики и генезиса максимальных уровней воды низкой обеспеченности в условиях климатических изменений (на примере р. Обь в черте г. Барнаула).

На Оби наводнения наблюдаются регулярно. В исторических документах сохранилась информация о наводнении, произошедшем в Барнауле в 1793 г. В работе [9] на основании исторических источников восстановлена хронология событий наводнения. В качестве причин указываются обильные снегопады, позднее начало весны с резким потеплением и сильным дождем, начавшемся 1 мая (12 мая по н. ст.). Даже с учетом того, что описываемые события относятся к эпохе так называемого Малого ледникового периода [10], вскрытие Оби произошло очень поздно, 4–5 мая (15–16 мая по н. ст.), в то время как обычно в те времена ледоход наблюдался 1–20 апреля (12 апреля – 1 мая) [9].

В XX в. наиболее сильные и разрушительные наводнения, сведения о которых задокументированы, наблюдались в 1928, 1937 и 1969 гг. Зима 1927–1928 гг. была необычайно снежной. 10 апреля 1928 г. газета «Красный Алтай» опубликовала на своих страницах «Предупреждение о могущем быть наводнении»[2]. Стремительный рост уровня воды был связан с резким потеплением, при этом ситуацию усугубил сформировавшийся у кожевенного завода и вблизи пос. Ильича затор. Максимальный уровень воды на Оби наблюдался 24 апреля и составил 711 см над нулем водомерного поста[3]. Весной следующего 1929 г. половодье сопровождалось двумя большими заторами и наводнением[4], при этом максимальный уровень наблюдался несколько раньше, 16 апреля, и составил 692 см. В последующие годы заторные наводнения такого масштаба на Оби в Барнауле не наблюдались.

Зима 1936–1937 гг. также была многоснежной. В связи с этим президиум Барнаульского городского совета 21 марта 1937 г. обнародовал постановление «О борьбе с наводнением»[5]. Половодье 1937 г. во многом повторило сценарий 1793 г. Ледоход на Оби начался поздно – в начале мая. 3 мая уровень воды поднялся до 483 см, в это же время наблюдались обильные осадки. К 10 мая уровень воды в реке достиг 645 см, а 16 мая – 763 см над нулем водомерного поста.

В 1969 г. случилось очередное крупное наводнение, чему также способствовали значительные снегозапасы, кроме того, из-за сильных и длительных морозов почвогрунты на водосборе промерзли на большую глубину. Уровень воды достиг катастрофических отметок дважды: в первый раз 6 мая в результате дружной весны с обильными дождями – 684 см, во второй раз – через месяц, 5–6 июня, от таяния снега в горной части бассейна – 737 см. (рис. 1*а*).

[2] Красный Алтай. Барнаул. 1928. № 85.
[3] Красный Алтай. Барнаул. 1928. № 97.
[4] Красный Алтай. Барнаул. 1929. № 87.
[5] Красный Алтай. Барнаул. 1937. № 61.

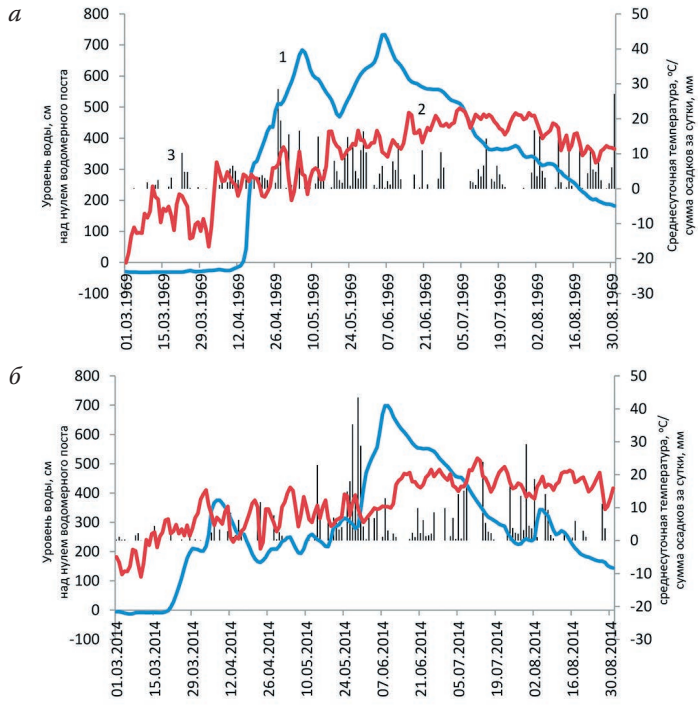


Рис. 1. Комплексный график гидрометеорологических элементов в период половодья в 1969 г. (*а*) и 2014 г. (*б*) гг.: 1 – уровень воды р. Обь, г. Барнаул; 2 – среднесуточная температура; 3 – сумма осадков, по данным ГМС Кызыл-Озек и Яйлю.
Fig. 1. A complex graph of hydrometeorological components during high water of 1969 (*a*) and 2014 (*b*): 1 – the Ob water level at Barnaul; 2 – the average daily temperature; 3 – the precipitation amount at the gauge Kyzyl-Ozek and Yaylu.

Следующее, и на данный момент последнее, катастрофическое наводнение произошло в Барнауле в 2014 г. Оно было вызвано аномально сильными экстремальными дождевыми осадками в предгорьях Алтая в конце мая – начале июня (рис. 1*б*), при этом год был относительно малоснежным [4]. Уровень достиг отметки 702 см.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является участок р. Оби в верхнем течении, в границах г. Барнаула. Выше Барнаула на Оби и ее крупнейших притоках отсутствуют крупные водохранилища, а зона подпора Новосибирского водохранилища до рассматриваемого участка не распространяется, поэтому изменение стоковых характеристик связано в основном с влиянием климатических факторов [11]. Основной фазой водного режима является половодье, за которое проходит от 40 до 80 % годового стока. Поскольку водный режим р. Оби формируется преимущественно в Алтайской горной области, за счет неравномерного таяния снега в разных высотных зонах половодье длительное, с апреля по июль, характеризуется наличием двух-трех волн. Максимум первой волны наблюдается в середине апреля – начале мая, второй – в конце мая – начале июня. Максимальные в году уровни воды и связанные с ними опасные гидро-

логические явления отличаются чаще всего во вторую волну половодья и формируются за счет таяния снега в горах. Для Оби, как и для других сибирских рек, характерно образование заторов льда, однако вблизи Барнаула их, как правило, не бывает. Средний многолетний максимальный уровень воды составляет 560 см над нулем водомерного поста. Максимальный уровень наблюдался 16 мая 1937 г. – 763 см. Наименьший максимальный уровень зафиксирован в 2012 г. 20 июля – 285 см. Отдельные микрорайоны Барнаула в период половодья регулярно затапливаются. По данным администрации г. Барнаула[6], отметка затопления микрорайона Затон составляет 560 см (что соответствует среднемноголетнему максимальному уровню), пос. Ильича – 650 см над нулем водомерного поста. Выход воды на пойму начинается при достижении отметки 500 см над нулем водомерного поста.

Основным показателем, характеризующим наводнения, является максимальный сток, выраженный через максимальные расходы или уровни воды [12]. По мнению авторов, предпочтительнее использовать уровенные, а не стоковые ряды, т. к. важнейшими критериями наводнений являются величина и вероятность превышения «опасной» отметки, при достижении которой начинается затопление селитебных территорий. При этом рост уровней не всегда напрямую связан с увеличением расходов (например, при образовании заторов). Следует учитывать и то, что близкие к максимальным расходы воды на р. Оби проходят при затопленной пойме. В этом случае вероятны значительные погрешности в учете пойменной составляющей расхода при построении и экстраполяции кривой расходов воды. Как следствие, возможны большие погрешности в определении расходов [13], в т. ч. в створе Обь–Барнаул [14]. Статистический анализ и расчет максимальных уровней воды является надежной основой для последующих работ по определению границ зон затопления и проектированию в бассейнах рек, т. к. измеренные на водомерных постах уровни интегрально отражают все факторы, определяющие их формирование [15].

В связи с этим в настоящем исследовании в качестве основного источника исходной информации использованы данные о ежегодных максимальных уровнях воды на гидрологическом посту (ГП) р. Обь – г. Барнаул за период с начала инструментальных наблюдений в 1894 до 2020 г., опубликованные в справочных изданиях Государственного водного кадастра[7], «Гидрологических ежегодниках»[8,9] и «Автоматизированной системе государственного мониторинга водных объектов»[10]. Кроме того, использовались данные об опасных гидрологических явлениях из архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» «Неблагоприятные условия погоды, нанесшие экономические потери»[11]. В архиве со-

[6] Электронный ресурс: https://barnaul.org (дата обращения: 1.02.2025).
[7] Государственный водный кадастр. Характерные уровни рек, каналов, озер, водохранилищ (погодичные данные). Вып. 10. Бассейны рек Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 256 с.
[8] Гидрологический ежегодник. Т. 6. Бассейн Карского моря (западная часть): Вып. 0–3. Л., 1949–1966.
[9] Гидрологический ежегодник. Т. 6. Бассейн Карского моря (западная часть). Вып. 0–3: р. Обь и ее бассейн до устья р. Иртыша. Новосибирск, 1968–1990.
[10] Электронный ресурс: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 1.02.2025).
[11] Электронный ресурс: http://meteo.ru (дата обращения: 1.04.2025).

держится информация о половодьях и паводках, вызвавших повышение уровней до отметок повторяемостью менее 10 % за период с 1991 по 2023 г.

Для оценки многолетней динамики максимальных уровней построен линейный тренд, значимость которого оценивалась в соответствии с рекомендациями ГГИ[12] по случайной среднеквадратической ошибке коэффициента корреляции σ_r:

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (1)$$

Если $\frac{r}{\sigma_r} \geq \beta$, тренд значим. При уровне значимости $\alpha = 5\ \%$ $\beta \approx 2$, при $\alpha = 1\ \%$ $\beta \approx 3$.

В качестве критерия опасности наводнений была принята вероятность превышения (обеспеченность) максимальных уровней воды. Этот показатель лежит в основе классификации наводнений по степени опасности, разработанной Б.М. Доброумовым и С.М. Тумановской в соответствии с классификацией МЧС [12]. Оценить социально-экономический ущерб (масштабы, площадь затопления населенных пунктов, количество пострадавшего населения и т. д.) в динамике не представляется возможным – слишком сильно изменились площадь и характер застройки, морфология русла и поймы, подходы к оценке ущерба.

Климатические изменения последних десятилетий привели к нарушению стационарности условий формирования стока рек. Поэтому при статистическом анализе гидрологических характеристик проверка рядов на однородность является первым и обязательным этапом. Проверка ряда выполнена с помощью критериев Фишера и Стьюдента, а также тестов Pettitt's test, Standard normal homogeneity test (SNHT), Buishand range test [16]. Аналогичный подход был реализован нами ранее при оценке климатообусловленных изменений стока рек Верхней Оби [17]. Год нарушения однородности определялся с помощью Pettitt's test, SNHT, Buishand range test [16], а также с помощью разностной и суммарной интегральных кривых.

Для оценки вероятности превышения гидрологических характеристик в условиях нестационарности, обусловленной влиянием климатических изменений (антропогенные факторы, такие как строительство крупных гидротехнических сооружений, в данном случае мы не рассматриваем), используются различные подходы.

В ГГИ при неоднородных рядах наблюдений рекомендовано использовать усеченные или составные кривые обеспеченностей[13] при обязательном учете исторического (выдающегося) максимума редкой повторяемости [18].

Задача оценки и прогноза как экстремальных значений гидрологических характеристик, так и многолетних колебаний стока в нестационарных условиях успешно решается с помощью байесовских подходов [19–21]. Основным преимуществом является то, что они позволяют определять расчетные

[12] Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор – История, 2010. 162 с.

[13] СТО ГГИ 52.08.41-2017. Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету. СПб.: ФГБУ «ГГИ», 2017. 46 с.

гидрологические характеристики явлений редкой повторяемости в условиях неопределенности климатических изменений с учетом различных сценариев изменения климата [19, 21].

В соответствии с современными нормативными документами[14] в случае неоднородности гидрологических рядов, обусловленной естественными факторами или влиянием изменения климата, эмпирические и аналитические кривые распределения строят отдельно для каждой однородной совокупности с применением составных кривых или по сумме распределений на основе байесовских подходов.

В данной работе для расчета максимальных уровней заданной обеспеченности построена составная кривая согласно СП 529.1325800.2023. Сглаживание и экстраполяция эмпирических кривых для однородных периодов выполнены с использованием трехпараметрического распределения Крицкого – Менкеля. Определение ординат аналитических кривых выполнено методом приближенного наибольшего правдоподобия. Параметры составной кривой обеспеченности (для двух генетически однородных элементов) рассчитывались по формуле:

$$P_{\%} = \frac{n_1 P_1 + n_2 P_2}{n_1 + n_2}, \quad (2)$$

где P_1, P_2 – значения, соответствующие заданной обеспеченности, а n_1, n_2 – длины каждой из однородных выборок.

В соответствии с классификацией [12] выделяются катастрофические наводнения (обеспеченностью менее 5 %), опасные наводнения (5 – 10 %), высокие половодья или дождевые паводки (11 – 25 %) и средние половодья или дождевые паводки (26 – 40 %). После расчета обеспеченности ежегодных максимальных уровней воды и выделения лет, в которых наблюдались наводнения, каждому событию был присвоен класс опасности.

Еще одним важнейшим показателем наводнений является их генезис. На территории Сибири наиболее частой причиной наводнений являются снеговые половодья и дождевые паводки, несколько реже – заторы. Часто наводнения обусловлены сочетанием нескольких факторов [3]. Для оценки генезиса наводнений построены комплексные графики гидрометеорологических элементов, включающие ход уровней воды на ГП р. Обь – г. Барнаул, сумму осадков и температуру воздуха по репрезентативным метеостанциям Кызыл-Озек и Яйлю. Наводнения начала XX в. оценивались методом историко-географического анализа по литературным и архивным данным, т. к. «Гидрологические ежегодники» публикуются только с 1936 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетняя динамика максимальных уровней воды

За период инструментальных наблюдений по ГП р. Обь – г. Барнаул произошло снижение максимальных уровней (рис. 2) и расходов [11] воды, несмотря на общий рост водности реки [22, 17]. Отношение коэффициента корреляции

[14] СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».

линейного тренда к его среднеквадратической ошибке $\frac{r}{\sigma_r}$ = 3,33, т. е. тренд значим при уровне значимости α = 1 %.

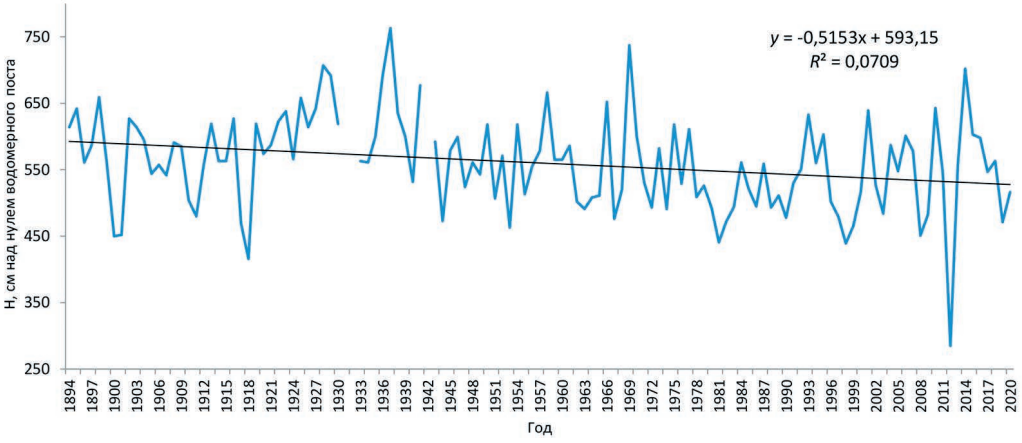


Рис. 2. Максимальные уровни воды на ГП р. Обь – г. Барнаул с 1894 по 2020 г.
Fig. 2. Maximum water levels of the Ob River at the city of Barnaul in 1894–2020.

Ряд однороден по дисперсии (значение *F*-критерия 1,15 при критическом 1,87), но неоднороден по среднему значению (*t*-критерий 3,67 при критическом 2), что подтверждает значимость линейного тренда.

Для построения составной кривой обеспеченности ряд был разделен на два условно однородных периода (рис. 3). На интегральных кривых момент нарушения однородности однозначно выделить не представляется возможным, прослеживается отклонение суммарной интегральной кривой вниз начиная с середины 1970-х годов. Согласно Pettitt's test и Buishand range test ступенчатый «перелом» определяется в 1961 г.

С учетом этого были построены аналитические кривые распределения максимальных уровней воды для однородных периодов 1894–1960 гг. и 1961–2020 гг., на основании которых построена составная кривая. Результаты расчета максимальных уровней воды заданной обеспеченности для однородных периодов и составной кривой представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения максимальных уровней воды заданной обеспеченности для однородных периодов и составной кривой распределения
Table 1. Maximum water levels at specified exceedance probability for homogeneous periods and a composite distribution curve

Период	Обеспеченные значения максимальных уровней с вероятностью превышения, см над нулем водомерного поста										
	P, %										
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1894–1960	719	682	657	645	633	621	612	604	596	589	581
1961–2020	727	676	641	624	607	591	578	567	556	546	536
1894–2020	723	679	653	637	622	608	596	587	578	570	561

В соответствии с табл. 1 и [12] все наводнения были классифицированы следующим образом: катастрофические наводнения (обеспеченностью менее 5 %) – с уровнем воды выше 679 см; опасные (5–10 %) – от 679 до 653 см; высокие (11–25 %) – от 654 до 608 см; средние (26–40 %) – от 609 до 578 см (рис. 4, табл. 2).

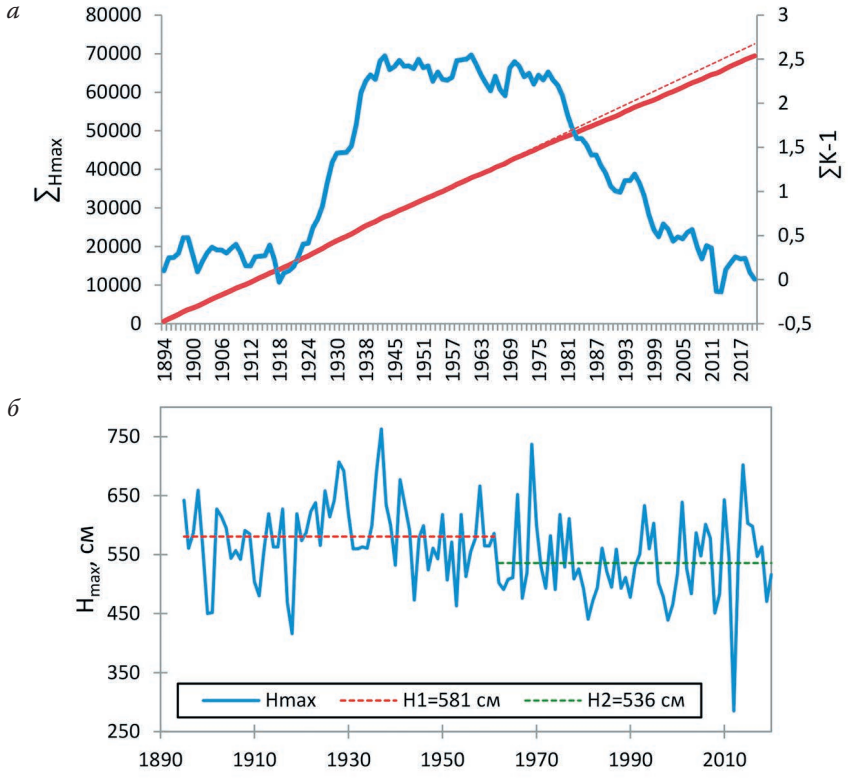


Рис. 3. Разностная и суммарная интегральные кривые максимальных уровней воды (*а*) и результат анализа на однородность с использованием Pettit's test (*б*).
Fig.3. Differential and total integral curves of maximum water levels (*a*); results of the Pettitt's test-based homogeneity analysis (*b*).

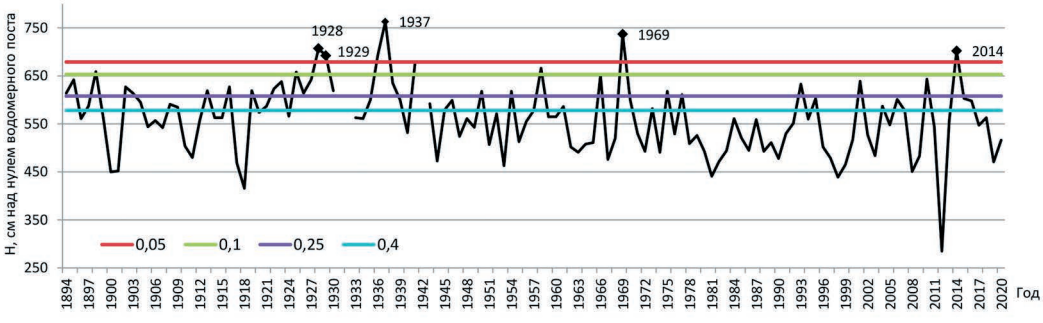


Рис. 4. Максимальные уровни воды за период 1894–2020 гг. и уровни воды заданной обеспеченности.
Fig. 4. Maximum water levels (1894-2020) and specified exceedance probability.

Генезис наводнений

На Оби, как и на большинстве рек с преобладающей долей снегового питания, максимальные уровни воды наблюдаются, как правило, в период половодья. Наиболее разрушительные наводнения обычно формируются при сочетании нескольких факторов: холодная и многоснежная зима, дружная весна, ливневые осадки в период половодья, заторы льда. При этом один-два фактора являются преобладающими.

Так, всем катастрофическим наводнениям XX в. предшествовали многоснежные зимы, а выпавшие в период снеготаяния жидкие осадки лишь способствовали дополнительному подъему уровня. В 2014 г. наводнение возникло исключительно из-за ливневых дождей, выпавших в горной части бассейна в конце мая (рис. 1*б*). Наводнения обеспеченностью менее 5 %, вызванные заторами в период снеготаяния, были в 1928 и 1929 гг. После 1940-х годов заторы в Барнауле не отмечались, что связано, вероятно, с изменением морфологии русла в результате русловых процессов, а также потеплением климата и уменьшением толщины льда.

Построение комплексных графиков гидрометеорологических элементов с 1936 г. позволило выявить главные факторы, способствовавшие возникновению наводнений в тот или иной год. По генезису наводнения были разделены на половодные (преимущественно за счет таяния снега), паводочные (вследствие дождей) и смешанного происхождения. Наводнения классифицировались как «смешанные» в том случае, если явно выраженный пик на гидрографе синхронизирован с ростом среднесуточных температур и значительным количеством жидких осадков. В отдельные многоснежные годы превышения уровней, соответствующих 40 % обеспеченности и менее, наблюдались неоднократно (в 1954, 1958, 1969 и 2006 гг. – дважды, а в 1941 г. – трижды), при этом каждый случай анализировался отдельно.

Предположительно, изменение генезиса и частоты наводнений связаны с климатическими факторами, поэтому был выполнен сравнительный анализ двух периодов – до начала интенсивного роста температур (с 1936 по 1976 г.) в соответствии с [23] и после него (табл. 3). Периоды практически одинаковые по длительности – 40 и 44 года соответственно, поэтому сравнение, на наш взгляд, весьма показательно. Ряд до 1936 г. в анализ не включен ввиду недостатка гидрометеорологической информации и невозможности с достаточной достоверностью определить генезис наводнений.

Начиная с 1977 г. практически вдвое снизилась частота возникновения наводнений по сравнению с предыдущим периодом. С 1978 по 1992 г. наводнений не наблюдалось. Генетический анализ показал, что и до начала глобального потепления, и в современный период более половины наводнений в Барнауле вызваны половодьями в результате снеготаяния (табл. 3), хотя после 1976 г. их доля несколько снизилась. При этом почти в два раза выросла доля наводнений, вызванных дождевыми паводками.

Таблица 2. Наводнения в Барнауле за период с 1894 по 2020 г.
Table 2. Barnaul inundations in 1894–2020

Класс опасности наводнений по [23]	P, %	Год
Катастрофические	Менее 5	1928, 1929, 1936, 1937, 1969*, 2014
Опасные	5–10	1898, 1925, 1941*, 1958*
Высокие	11–25	1894, 1895, 1902, 1903, 1913, 1916, 1919, 1922, 2923, 1926, 1927, 1930, 1938, 1950, 1954*, 1958*, 1966, 1975, 1977, 1993, 2001, 2010
Средние	26–40	1897, 1908, 1909, 1921, 1935, 1939, 1941*, 1943, 1945, 1946, 1954* 1961, 1970, 1973, 1995, 2004, 2006*, 2015, 2016

* – годы с неоднократным подъемом уровня заданной вероятности превышения.

Таблица 3. Количество и генезис наводнений в Барнауле в 1936–1976 гг. и 1977–2020 гг.
Table 3. Number and genesis of Barnaul inundations in 1936–1976 and 1977–2020

Период	Количество	Частота	Генезис (% от общего числа за период)		
			Половодья	Паводки	Смешанные
1936–1976	21	5,2 раза / 10 лет	13 (61,9 %)	3 (14,3 %)	5 (23,8 %)
1977–2020	11	2,5 раза / 10 лет	6 (54,5 %)	3 (27,3 %)	2 (18,2 %)

Особенно показательно сокращение количества наводнений, отнесенных к категориям катастрофических и опасных. В современный период случилось только одно такое наводнение – в 2014 г., максимальный уровень 702 см над нулем водомерного поста соответствовал 3 % обеспеченности. Вместе с тем следует отметить некоторый рост числа наводнений с начала 1990-х годов по сравнению с предыдущим 20-летним периодом. Отметка начала затопления 560 см с 1991 г. была превышена в 11 раз.

Таким образом, несмотря на общий рост водности, в верхнем течении Оби наблюдается снижение максимальных уровней воды и повторяемости наводнений низкой обеспеченности. Причина, на наш взгляд, заключается в следующем. Ранее нами было установлено, что в связи с климатическими изменениями на реках Верхнеобского бассейна наблюдается увеличение доли зимней межени в годовом стоке и снижение доли талого стока. Повсеместно отмечается нарушение однородности зимнего стока, в ряде случаев неоднороден и сток половодья [17]. Подобные тенденции характерны для рек со значительной долей снегового питания [23, 24] и связаны с увеличением количества оттепелей, уменьшением глубины промерзания грунтов и ростом грунтового питания в зимний период. Кроме того, на р. Оби за счет сдвига снеготаяния на более ранние даты увеличился сток в первую волну половодья, в апреле, и снизился – в более многоводную вторую волну, в мае – июле. [11]. В то же время наблюдается рост доли быстроразвивающихся наводнений вследствие экстремальных дождевых осадков, что характерно в целом для территории России[15].

[15] Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. СПб, 2022. 676 с.

ВЫВОДЫ

Наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения в значительной степени повлияли на уровенный режим р. Оби и, как следствие, частоту наводнений. Анализ ряда продолжительностью более 120 лет показал снижение максимальных уровней воды. Линейный тренд значим на уровне 1 %. Снижение максимальных уровней и, как следствие, частоты наводнений связано с перераспределением стока внутри года – ростом зимней межени, снижением талой составляющей в стоке половодья, особенно в его более многоводную вторую волну.

С учетом неоднородности ряда была построена составная кривая распределения вероятности превышения максимальных уровней воды, определены уровни заданной обеспеченности. По результатам статистического и генетического анализа наводнениям обеспеченностью 40 % и ниже был присвоен класс опасности и определен их генезис.

Выполнен сравнительный анализ частоты возникновения наводнений разного генезиса и класса опасности до начала климатических изменений в 1976 г. и в современный период. Установлено, что после 1976 г. частота наводнений снизилась практически вдвое, а наводнение обеспеченностью ниже 10 % наблюдалось только один раз – в 2014 г. Доля наводнений, вызванных снеготаянием, снизилась с 62 % (до 1976 г.) до 55 % в современный период, при этом доля наводнений от быстроразвивающихся дождевых паводков выросла вдвое. В современный период не наблюдалось ни одного наводнения от снеготаяния обеспеченностью менее 10 %. Увеличение частоты наводнений дождевого происхождения, в т. ч. в период половодья, приводит к снижению предсказуемости максимума половодья от запаса воды в снежном покрове.

Таким образом, климатические изменения не всегда способствуют увеличению повторяемости опасных гидрологических явлений, даже в условиях общего увеличения водности рек. На первый взгляд благоприятная тенденция снижения частоты наводнений ведет к интенсификации хозяйственного освоения прибрежных территорий, что, в свою очередь, повышает риск катастрофических затоплений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котляков В.М., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Лихачёва Э.А., Маккавеев А.Н., Медведев А.А., Рудаков В.А. Наводнение 6–7 июля 2012 года в городе Крымске // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. №.6. С. 80–88. DOI: 10.15356/0373-2444-2012-6-80-88.
2. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 2. С. 111. DOI: 10.7868/S0321059614020059.
3. Кичигина Н.В. Наводнения Сибири: географический и статистический анализ за период климатических изменений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021 Т.66. № 1. С. 41–60. DOI: 10.21638/spbu07.2021.103.

4. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., Коломейцев А.А. Экстремальный дождевой паводок 2014 года в бассейне Верхней Оби: причины, прогноз и натурные наблюдения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 6. С. 93–104.
5. Georgievskii V.Y., Grek E.A., Grek E.N., Lobanova A.G., Molchanova T.G. Assessment of Modern Changes in Maximum River Flow in Russia // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. Vol. 44. No. 11. P. 739–745. DOI 10.3103/S1068373919110037.
6. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Лупян Е.А. Мониторинг последствий наводнения в Оренбургской области при половодье на реке Урал в 2024 году // Мониторинг. 2024. Т. 21. №. 3. С. 339–347. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-339-347.
7. Сивохип Ж.Т., Падалко Ю.А. Географо-гидрологические факторы опасных гидрологических явлений в бассейне реки Урал // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 6. С. 53–61. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-6-53-61.
8. Бирюков Е.С., Терентьев Н.Е. К оценке экономического ущерба от наводнений в России и потенциала адаптации // Теория и практика общественного развития. 2024. №. 11. С. 162–168. DOI:10.24158/tipor.2024.11.19.
9. Демин А.М. Результаты изучения катастрофического наводнения 1793 г. на Барнаульском заводе (из опыта реализации регионального компонента) // Известия Алтайского государственного университета. 2007. №. 4-1. С. 26–32.
10. Жилина Т.Н. Западная Сибирь в Малый ледниковый период: природа и русская колонизация (1550–1850 гг.). Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2008. 180 с.
11. Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В., Коломейцев А.А. Изменение гидрологических характеристик р. Оби под влиянием климатических изменений в 1922–2020 гг. (по данным наблюдений в г. Барнауле) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 4. С. 75–88. DOI: 10.18799-24131830-2025-4-46-27.
12. Доброумов Б.М., Тумановская С.М. Наводнения на реках России: их формирование и районирование // Метеорология и гидрология. 2002. №. 12. С. 70–78.
13. Барышников Н.Б., Исаев Д.И., Сакович В.М. Методы расчетов максимальных расходов воды руслопойменных потоков в условиях изменения климата // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2019. Т. 29. №. 1. С. 90–96.
14. Барышников Н.Б. Об учете взаимодействия руслового и пойменного потоков при построении и экстраполяции кривых расходов воды // Труды Ленинградского государственного гидрометеорологического университета. Вып. 25. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. С. 41–49.
15. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Осипова Н.В., Филиппова И.А. Анализ многолетней изменчивости и оценка максимальных уровней воды в условиях увеличившейся антропогенной нагрузки на примере р. Амур // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 80–89. DOI: 10.3103/S1068373916080082.
16. 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.
17. Самойлова С.Ю., Ловцкая О.В., Голубева А.Б. Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 21–38. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-21-38.
18. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. Условия формирования катастрофического паводка 2019 года на реке Ие и оценка его характеристик // География и природные ресурсы. 2020. № 4 (163). С. 86–94. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(86-94).
19. Болгов М.В. Стохастическая гидрология: развитие основных идей в России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 66 (1). С. 19–40. DOI: 10.21638/spbu07.2021.102.
20. Болгов М.В., Филиппова И.А., Коробкина Е.А., Осипова Н.В. О методе вероятностного прогнозирования экстремальных гидрологических событий в условиях изменений климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29. №. 1. С. 19-31. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-1-19-31.
21. Болгов М.В. Оценка гидрологических и водохозяйственных характеристик в условиях неопределенности факторов формирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 6–17. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-4-6-17.

22. Кошелева Е.Д., Зиновьев А.Т. Анализ изменения водности рек Обь-Иртышского бассейна в условиях изменения климата // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2017. № 3 (46). С. 80–86.
23. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
24. Lilhare R., Déry S.J., Stadnyk T.A., Pokorny S., Koenig K.A. Warming soil temperature and increasing baseflow in response to recent and potential future climate change across northern Manitoba, Canada // Hydrological Processes. 2022. Т. 36. № 11. P. e14748. DOI: 10.1002/hyp.14748.

REFERENCES

1. Kotlyakov V.M., Desinov L.V., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Likhacheva E.A., Makkaveev A.N., Medvedev A.A., Rudakov V.A. Flood of July 6–7, 2012 in the city of Krymsk. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography. 2015. №.6. Pp. 80–88. DOI: 10.15356/0373-2444-2012-6-80-88.
2. Danilov-Danilyan V.I., Gelfan A.N., Motovilov Yu.G., Kalugin A.S. Catastrophic flood of 2013 in the Amur River basin: conditions of formation, assessment of repeatability, simulation results. Water resources. 2014. Vol. 41, No. 2. P. 111. DOI: 10.7868/S0321059614020059.
3. Kichigina N.V. Floods of Siberia: geographical and statistical analysis for the period of climatic changes. Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences. 2021 Vol. 66. No. 1. P. 41–60. DOI: 10.21638/spbu07.2021.103.
4. Zinoviev A.T., Koshelev K.B., Dyachenko A.V., Kolomeitsev A.A. Extreme rain flood of 2014 in the Upper Ob basin: causes, forecast and field observations. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2015. No. 6. P. 93–104.
5. Georgievskii V.Y., Grek E.A., Grek E.N., Lobanova A.G., Molchanova T.G. Assessment of Modern Changes in Maximum River Flow in Russia. Russian Meteorology and Hydrology. 2019. Vol. 44. No. 11. P. 739–745. DOI 10.3103/S1068373919110037.
6. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Lupyan E.A. Monitoring of flood consequences in Orenburg Oblast during high water on the Ural River in 2024. Monitoring. 2024. Vol. 21. No. 3. P. 339–347. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-339-347.
7. Sivokhip Zh.T., Padalko Yu.A. Geographical and hydrological factors of dangerous hydrological events in the Ural River basin. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geography. 2014. No. 6. P. 53–61. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-6-53-61.
8. Biryukov E.S., Terentyev N.E. Assessment of economic damage from floods in Russia and the potential for adaptation. Theory and practice of social development. 2024. No. 11. P. 162–168. DOI:10.24158/tipor.2024.11.19 2.
9. Demin A.M. The results of studying the disastrous flood of 1793 at the Barnaul plant (experience in the regional component application). Proceedings of the Altai State University. 2007. No. 4–1. P. 26–32.
10. Zhilina T.N. Western Siberia in the Little Ice Age: nature and Russian colonization (1550–1850). Tomsk: National Research Tomsk State University, 2008. 180 p. (In Russ.).
11. Samoilova S.Yu., Mardasova E.V., Kolomeitsev A.A. Changes in the hydrological characteristics of the Ob River under climate change in 1922–2020. (according to observations in Barnaul). Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Geo/resource engineering. 2025. Vol. 336. No. 4. P. 75–88. DOI:10.18799/24131830-2025-4-46-27.
12. Dobroumov B.M., Tumanovskaya S.M. Floods on the rivers of Russia: their formation and zoning. Meteorology and Hydrology. 2002. No. 12. P. 70–78.
13. Baryshnikov N.B., Isaev D.I., Sakovich V.M. Methods of the channel/floodplain maximal water flow under the climate change conditions. Bulletin of Udmurt University. Series "Biology. Sciences of the Earth". 2019. Vol. 29. No. 1. P. 90–96.
14. Baryshnikov N.B. About taking into account interaction between the channel and floodplain flows in plotting and extrapolation of the water flow curves. Proceedings of Leningrad State Hyddro/meteorological University. Issue 25. L.: Gidrometeoizdat, 1967. P. 41–49.
15. Bolgov M.V., Korobkuna E.A., Osipova N.V., Filipppova I.A. Analysis of the many-year variability and assessment of maximal water levels under the conditions of increasing anthropogenic

load with the Amur River as a study case. Meteorology and hydrology. 2016. No. 8. P. 80–89. DOI: 10.3103/S1068373916080082.
16. 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.
17. 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.
18. Feorgievskiy V.Y., Grek E.A., Lobanova A.G., Molchanova T.G. Conditions of the Iya River 2019 catastrophic flood formation and assessment of its characteristics. Geography and natural resources. 2020. No. 4 (163). P. 86–94. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(86-94).
19. Bolgov M.V. Stochastic hydrology: development of the main ideas in Russia. Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences. No 66 (1). P. 19–40. DOI: 10.21638/spbu07.2021.102
20. Bolgov M.V., Filipppova I.A., Korobkuna E.A., Osipova N.V. About the method of probabilistic forecasting of extreme hydrological events under the climate change conditions. Problems of ecological monitoring and ecosystems modelling. 2018. Vol. 29. No. 1. P. 19–31. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-1-19-31.
21. Bolgov M.V. Assessment of hydrological and water/economic characteristics in the conditions of the formation factors uncertainty. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2016. No. 4. P. 6–17. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-4-1.
22. Kosheleva E.D., Zinoviev A.T. Analysis of changes in the water content of rivers in the Ob-Irtysh basin under climate change. Proceedings of the Altai Branch of the Russian Geographical Society. 2017. No. 3 (46). P. 80–86.
23. Water resources of Russia and their use / ed. I.A. Shiklomanov. St. Petersburg: GGI, 2008. 600 p. (In Russ.).
24. Lilhare R., Derry S.J., Stadnyk T.A., Pokorny S., Koenig K.A. Warming soil temperature and increasing baseflow in response to recent and potential future climate change across northern Manitoba, Canada. Hydrological Processes. 2022. Vol. 36. No. 11. P. e14748. DOI: 10.1002/hyp.14748.

Сведения об авторах:

Самойлова Светлана Юрьевна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, 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

Казанцева Василина Александровна, старший лаборант-исследователь, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0009-0006-4512-4324

About the authors:

Svetlana Y. Samoilova, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, SB RAS Institute for Water and Environmental Problems. Ul. Molodezhnaya 1, Barnaul, Russia, 656038; ORCID: 0000-0002-3365-0048, e-mail: bastet@iwep.ru

Vasilina A. Kazantseva, Senior Laboratory Research Assistant, SB RAS Institute for Water and Environmental Problems. Ul. Molodezhnaya 1, Barnaul, Russia, 656038; ORCID: 0009-0006-4512-4324

Поступила в редакцию / Received 05.05.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 25.05 2025.
Принята к публикации / Accepted 10.06.2025.

УДК 556.5 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-50-63*

Влияние климатического снижения весеннего стока и гидротехнического регулирования на условия воспроизводства рыб Азово-Донского рыбохозяйственного района

(на примере участка поймы у станицы Раздорской)

А.А. Семенова[1], А.В. Гончаров[1], А.Г. Георгиади[2], И.П. Милюкова[2]

sem.nut2013@yandex.ru

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рыбное хозяйство Нижнего Дона находится в кризисном состоянии. Основная причина – нарушение процессов естественного воспроизводства рыб, вызванное отсутствием обводнения пойменных нерестилищ вследствие снижения объемов весеннего стока р. Дон. Причиной этого, по мнению многих исследователей, является создание Цимлянского водохранилища, ежегодно изымающего значительную часть весеннего стока, а также отмечаемый в современный период маловодный цикл водности р. Дон. Цель исследования – оценить роль гидротехнического регулирования, а также климатического снижения весеннего стока р. Дон и степень его влияния на воспроизводство рыб Азово-Донского рыбохозяйственного района. **Методы.** Применен методологический подход, позволивший впервые отдельно оценить влияние Цимлянского гидроузла на воспроизводство рыб на Нижнем Дону, с одной стороны, и климатического снижения весеннего стока – с другой. Основой этого метода является расчет площадей пойменных нерестилищ в районе гидрологического поста Раздорская при рассмотрении гипотетического сценария, предполагающего отсутствие Цимлянского гидроузла. **Результаты** показали, что влияние климата меньше, чем влияние водохранилища, но сопоставимо с ним. Площади пойменных нерестилищ (в районе исследования) под воздействием водохранилища уменьшаются в 2,9 раза, а под влиянием климатического снижения весеннего стока – в 2,1 раза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Нижний Дон, Цимлянское водохранилище, снижение весеннего стока, пойменные нерестилища, сеголетки леща, нерест рыб, снижение уловов.

Финансирование: Исследование проведено в рамках госзадания НИР кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (№ ЦИТИС: 121051400038-1). Анализ климатических изменений выполнен при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Восстановление стока р. Дон производилось в рамках госзадания Института географии РАН FMWS-2024-0007 «Биотические, географо-гидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования».

Для цитирования: Семенова А.А., Гончаров А.В., Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Влияние климатического снижения весеннего стока и гидротехнического регулирования на условия воспроизводства рыб Азово-Донского рыбохозяйственного района (на примере участка поймы у станицы Раздорской) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 50–63. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-50-63, EDN: NWNWDS

© Семенова А.А., Гончаров А.В., Георгиади А.Г., Милюкова И.П., 2025

The spring runoff climatic decrease and hydraulic engineering regulation influence on the fish reproduction conditions in the Azov-Don fishery area

(the floodplain area near the village of Razdorskaya as a study case)

Anna A. Semenova[1] ✉, **Alexander V. Goncharov**[1], **Alexander G. Georgiadi**[2], **Irina P. Milyukova**[2]

✉ sem.nut2013@yandex.ru

[1]*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Moscow, Russia*
[2]*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The Lower Don is an important water body in Russia in terms of fisheries, but the fisheries of this region are in a depressed state. The main reason is considered to be a violation of fish reproduction due to reduced spring runoff, which results in insufficient (and in many recent years, even no) flooding of floodplain spawning grounds and their degradation. Most scientists believe that the main factor in this violation is the Tsimlyansk reservoir. Much less importance is attached to reducing spring runoff due to climatic factors. **Methods.** This article uses a method that made it possible for the first time to assess separately the impact of the Tsimlyansk reservoir and the climatic decrease in spring runoff on fish spawning. The method is based on the calculation of the areas of floodplain spawning grounds for a hypothetical variant when the Tsimlyansk hydroelectric complex is absent. **Results.** We have demostrated that the influence of the climate is less than the influence of the reservoir, but comparable to it. The areas of floodplain spawning grounds decrease by 2.9 times under the influence of the reservoir, and by 2.1 times under the influence of climate. This article also presents proposals for the restoration of floodplain spawning grounds of the Lower Don.

KEYWORDS: the Lower Don, Tsimlyansk reservoir, lowering of the spring runoff, floodplain spawning grounds, bream this year small fish, fish spawning, catch reducing

Financing: The research has been conducted within the framework of R&D governmental assignment for Lomonosov Moscow University Geographic Department Chair of Inland Hydrology (No. TsITIS: 121051400038-1). Analysis of climatic changes has been made with assistance of Lomonosov Moscow University Inter-disciplinary scientific-educational school "Future of the Planet and global changes of environment". Restoration of the Don River runoff was made within the framework of governmental assignment for RAS Institute of Geography FMWS-2024-0007 "Biotic, geographic/hydrological and landscape assessments of environment in order to establish the basis for rational nature use".

For citation: Semenova A.A., Goncharov A.V., Georgiadi A.G., Milyukova I.P. The spring runoff climatic decrease and hydraulic engineering regulation impact on the fish reproduction conditions in the Azov-Don fishery area (the floodplain area near the village of Razdorskaya as a study case). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 3. P. 50–63. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-50-63, EDN: NWNWDS

ВВЕДЕНИЕ

Пойма Нижнего Дона всегда играла ключевую роль в процессах воспроизводства рыбных ресурсов, особенно в период весеннего половодья, когда на свежезалитой растительности происходит нерест полупроходных фитофильных видов рыб [1]. Эти виды (лещ, сазан, судак, тарань) ранней весной поднимаются из Таганрогского залива Азовского моря и откладывают икру в реке на заливаемой весной растительности в пойме. Икра некоторое время инкубируется, из нее выводятся личинки, они подрастают и в этом же году скатываются по реке в море; производители возвращаются в море еще раньше.

Сейчас рыбное хозяйство Нижнего Дона находится в упадке: нарушены процессы естественного воспроизводства рыб, в несколько десятков раз сократились уловы ценных промысловых видов, сократились площади пойменных нерестилищ [1–4].

Деградация рыбного хозяйства на Нижнем Дону обусловлена рядом факторов, включая браконьерство, изменение физико-химических параметров Азовского моря [5], необратимые процессы застройки поймы [4, 6]. Но большинство ученых сходится во мнении, что основная причина заключается в снижении эффективности нереста рыб из-за того, что в результате строительства Цимлянского гидроузла стали значительно реже заливаться пойменные нерестилища в весеннее время [1–4, 6, 7].

В начале 1970-х годов, помимо воздействия Цимлянского водохранилища, добавился еще один негативный, но малоизученный фактор – снижение весеннего стока, вызванное изменением климата в бассейне Дона [8, 9].

Целью данного исследования является раздельная оценка влияния Цимлянского гидроузла и климатических изменений на состояние пойменных нерестилищ Нижнего Дона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования

В качестве района исследования площадей пойменных нерестилищ (рис. 1) выбран участок в районе гидрологического поста (ГП) р. Дон – станица Раздорская.

Протяженность участка от населенного пункта Донские Зори до г. Семикаракорска составляет 15 км. Данная территория выбрана из-за наибольшей освещенности гидрологическими данными водомерного поста Раздорская, где расположена часть нерестилищ фитофильных видов рыб.

Исходные данные

В исследовании использованы данные по ежедневным расходам воды на ГП Раздорская за период 1936–2018 гг, опубликованные в Гидрологических ежегодниках[1], и с сайта АИС ГМВО[2].

[1] Гидрологические ежегодники (за 1936–1987 гг.). Т. 2. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа). Вып. 7–9. Бассейн р. Дон. Л.: Гидрометеоиздат.

[2] Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Режим доступа: https://gmvo.skniivh.ru/ (дата обращения: 24.10.2024)

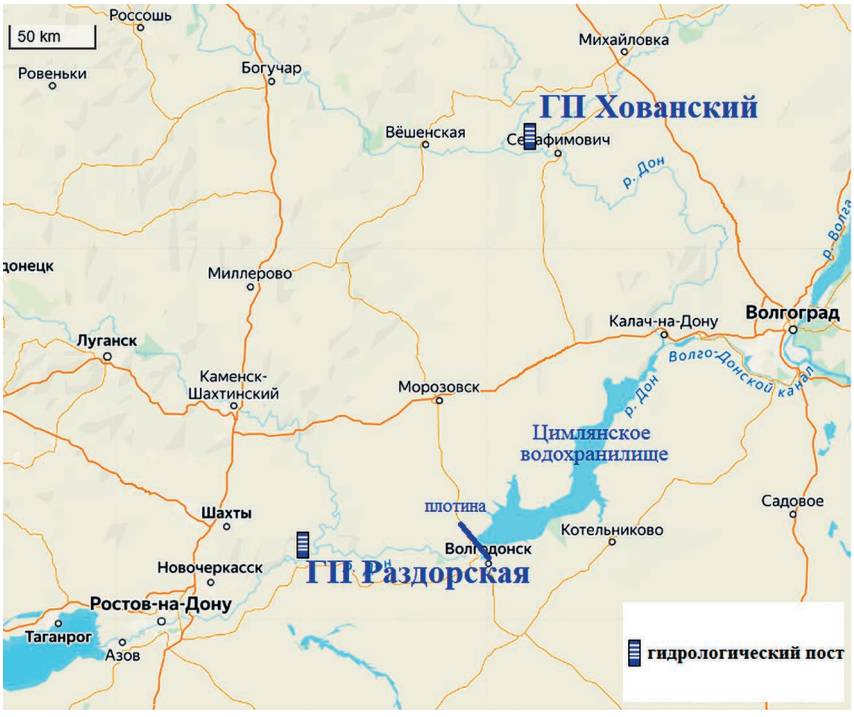


Рис. 1. Схема района исследования.
Fig. 1. The scheme of the research area.

По ежедневным расходам и уровням воды за маловодные 2008–2018 гг. и многоводные 1963, 1964, 1979 гг. были восстановлены значения уровней воды за нерестовый (март – июнь) период 1936–2018 гг. (рис. 2).

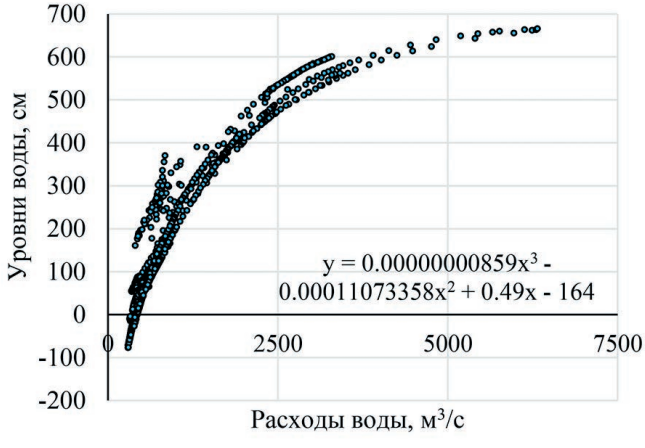


Рис. 2. Связь уровней и расходов воды (с марта по июнь) р. Дон на ГП Раздорская.
Fig. 2. Relationship of water levels and flow rates (from march to june)
of the Don River at the Razdorskaya hydrological post.

Определение площадей залития Нижнего Дона в районе гидрологического поста Раздорская

С помощью топографических карт Государственного ГИС Центра (ГГЦ) масштаба 1:25000 и программы ArcMap были получены площади залития поймы на рассматриваемом участке р. Дон при разных уровнях воды.

После нахождения связи между площадями залития поймы и уровнями воды определялись площади залития поймы за каждый год с 1936-го по 2018-й в месяцы весеннего нереста (март – июнь). При этом учитывались дни с температурой воды больше 8 °С, благоприятные для нереста фитофильных рыб (на примере леща).

Связь между численностью сеголеток леща и расходами воды Нижнего Дона

Из работы И.Н. Иванченко [4] заимствованы данные по численности сеголеток леща за период 1953–1998 гг. Лещ выбран в качестве модельного объекта исследования как наиболее хорошо изученный фитофильный вид, имеющий большое значение в рыбном промысле Нижнего Дона. Была получена зависимость между стоком воды в створе ГП р. Дон – станица Раздорская и численностью сеголеток (коэффициент корреляции по Спирмену равен 0,52) (рис. 3).

Данную связь можно улучшить (r = 0,76), если рассматривать только благоприятные для нереста рыб годы (когда вода выходит на пойму при температуре воды больше 8 °С) (рис. 4).

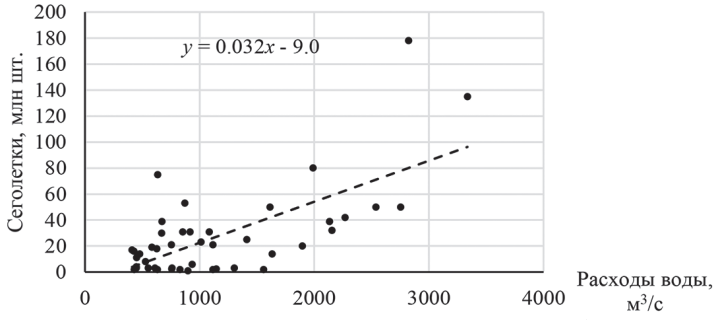


Рис. 3. Связь между численностью сеголеток леща Нижнего Дона и весенними расходами воды (за месяцы с апреля по май) в створе ГП р. Дон – станица Раздорская.
Fig. 3. Relationship between the number of fingerlings of the Lower Don bream and spring water consumption (for the months from April to May) of the Don River – Razdorskaya village.

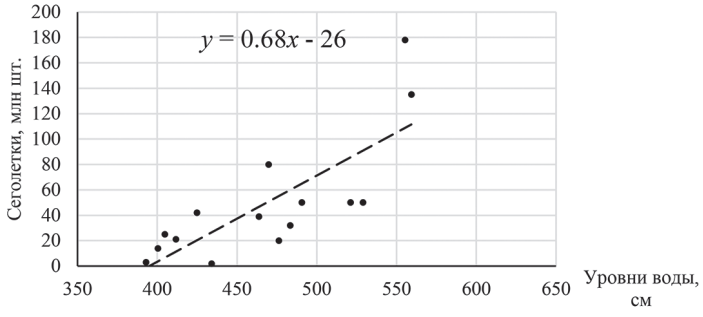


Рис. 4. Связь между уровнем воды и численностью сеголеток леща при выходе воды (с температурой > 8 °С) на пойму р. Дон (ГП Раздорская).
Fig. 4. The relationship between the water level and the number of bream fingerlings at the water outlet to the floodplain of the Don and rivers temperature > 8 °C (Razdorskaya hydrological post).

Определение расходов воды для гипотетической ситуации отсутствия Цимлянского водохранилища

Восстановление условно-естественного (ежедневного) стока р. Дон на ГП Раздорская производилось по гидрологическому посту Хованский, расположенному на 650 км выше по течению (рис. 1). Был применен метод Г.П. Калинина и П.И. Милюкова [10–12]. При этом исходили из того, что в пойме реки отсутствуют результаты хозяйственной деятельности, появившиеся после создания Цимлянского гидроузла (сельскохозяйственные угодья, различные строения). Они не могли появиться в пойме, которая практически ежегодно заливалась водами весеннего половодья.

Согласно этому методу, расход воды в створе ГП Раздорская рассчитывается по интегралу

$$Q(t) = \int_0^t q(t)\, P(t - \tau)\, d\tau,$$

где $Q(t)$ – расход в замыкающем створе в момент времени t; $q(t)$ – расход на входе расчетного участка (т. е. расход воды на гидрологическом посту Хованский); $P(t)$ – функция влияния (кривая добегания).

$$P(t) = \frac{1}{\tau(n-1)!}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)},$$

где n – количество характерных участков с одинаковым временем добегания, равным τ.

Для определения параметров функции влияния использовались среднесуточные расходы воды в створе ГП Хованский за период 1938–1950 гг. (т. е. за период времени, когда антропогенное воздействие на сток р. Дона фактически отсутствовало).

Параметры n и τ определялись методом подбора. При этом допускалось равенство объемов воды во входном (ГП Хованский) и выходном (ГП Раздорская) створах с учетом бокового притока на участке между верхним и нижним створами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Карты залития участка поймы Нижнего Дона при разных уровнях воды в районе гидрологического поста Раздорская

На рис. 5 представлено изменение площадей пойменных нерестилищ при различных уровнях воды.

При достижении уровнем воды отметки 390 см над нулем графика поста (на 20 см превышающей уровень бровки) уже возможен нерест фитофильных рыб. Однако площадь залития поймы еще сравнительно невелика и составляет всего 8 км^2 в пределах рассматриваемого района.

Площади залития сильно увеличиваются лишь после достижения уровнем воды отметки 470 см. Это обусловлено ландшафтными особенностями формирования поймы (крутыми берегами прирусловых участков Нижнего Дона и его пологой поймой).

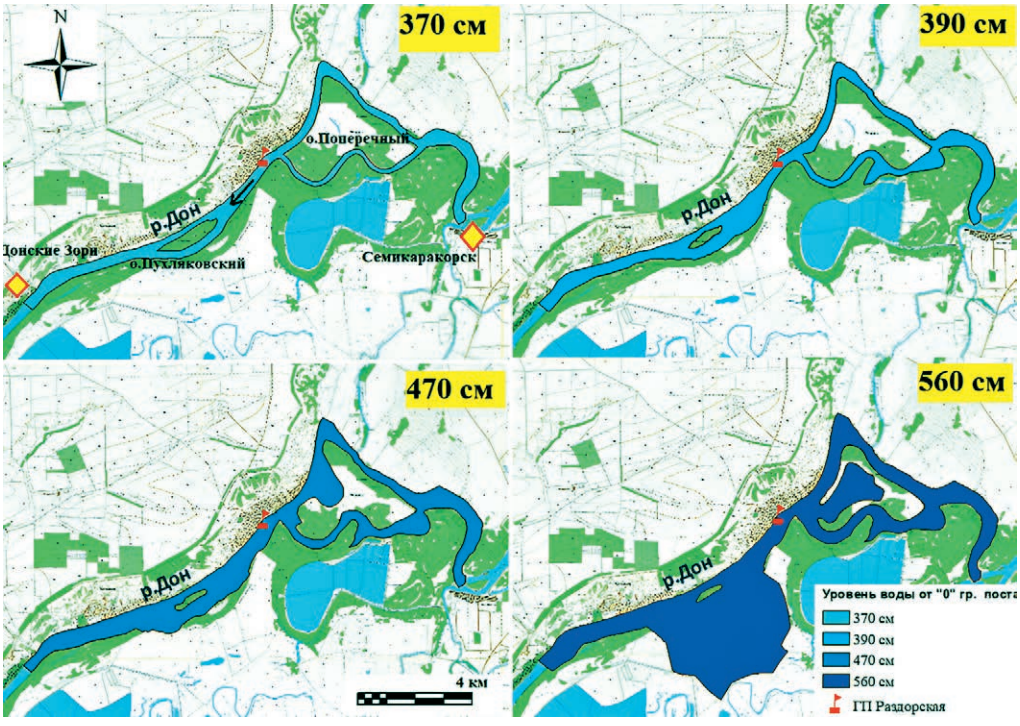


Рис. 5. Карты залития поймы р. Дон при разных уровнях воды на участке поймы в районе ГП Раздорская.
Fig. 5. Maps of floodplain flooding of the Don River at different water levels in the floodplain area in the area of the hydrological post of the Razdorskaya village.

Важно отметить, что на Нижнем Дону существует серьезная проблема застройки пойменных нерестилищ, за счет чего существенно уменьшаются их площади, нарушается режим обводнения и снижается эффективность нереста.

Так, в [6] показано, что в последнее время из-за того, что весенние разливы на Дону крайне редки, пойменные земли стали активно осваиваться, в особенности сельскохозяйственной и строительной отраслями (распашкой пойменных земель, промышленным и гражданским строительством). В соответствии с [4], в 2020 г. 42 % всей поймы было распахано; площадь хозяйственной застройки составила 4 %. В исследовании [13] с помощью ретроспективного численного моделирования выявлено значительное изменение в режиме уровней воды, вызванное интенсивным хозяйственным использованием поймы.

Связь между уровнем воды и площадями залития поймы Нижнего Дона в районе гидрологического поста Раздорская

В ходе данного исследования построен график связи между площадью залития поймы и уровнем воды на ГП Раздорская, r = 0,97 (рис. 6).

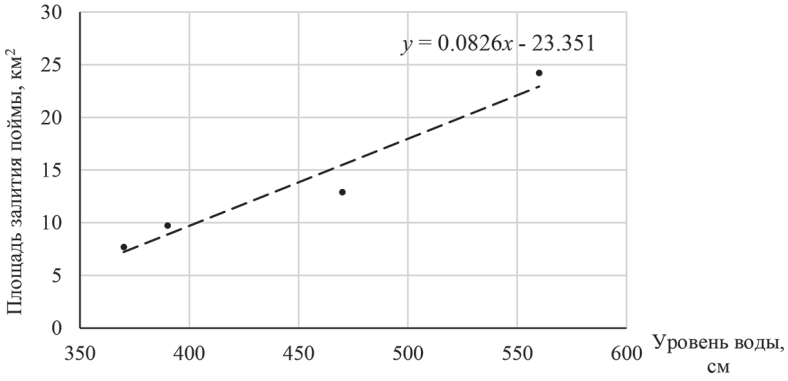


Рис. 6. Зависимость между уровнем воды и площадью залития поймы (в районе ГП Раздорская).
Fig. 6. The relationship between the floodplain level and floodplain area (in the area of the Razdorskaya hydrological post).

Зависимость между расходами воды, заливаемой площадью в районе гидрологического поста Раздорская и численностью сеголеток леща Нижнего Дона

В ходе данного исследования выявлено, что изменения площади залития поймы в районе ГП Раздорская и площади залития всей поймы Нижнего Дона [1] сильно скоррелированы (r = 0,95). Это говорит о том, что результаты, полученные на небольшом участке у Раздорской, хорошо отражают ситуацию на всей пойме Нижнего Дона.

Результаты исследования показали (рис. 3), что при расходе воды до 2 820 м^3/с (обеспеченности стока до 25 %) и площади нерестилищ у Раздорской около 26 км^2 численность сеголеток леща Нижнего Дона составляет в среднем 60 млн шт. (с максимумом 178 млн шт.). При расходе воды до 670 м^3/с (обеспеченности стока от 25 до 50 %) численность сеголеток леща составляет в среднем 40 млн шт. (с максимумом 75 млн шт.). При расходе воды до 580 м^3/с (обеспеченности стока от 50 до 75 %) численность сеголеток леща составляет в среднем 20 млн шт. (с максимумом 53 млн шт.). При расходе воды 410 м^3/с (обеспеченности стока от 75 до 95 %) и площади нерестилищ 10 км^2 численность сеголеток леща составляет в среднем 7 млн шт. (с максимумом 17 млн шт.).

По данным о численности сеголеток леща и площадям залития поймы на исследуемом участке (в районе ГП Раздорская) построен график связи (рис. 7), из которого видно, что при увеличении площади нерестилищ численность сеголеток увеличивается (r = 0,78).

Расходы воды реки Дон (гидрологический пост Раздорская) фактические и восстановленные (с Цимлянским водохранилищем и без него)

Анализируя изменения измеренных весенних расходов воды в створе ГП р. Дон – станица Раздорская за 1936–2018 гг. и их разностную интегральную кривую, можно сказать, что в целом наблюдается тенденция к снижению водности.

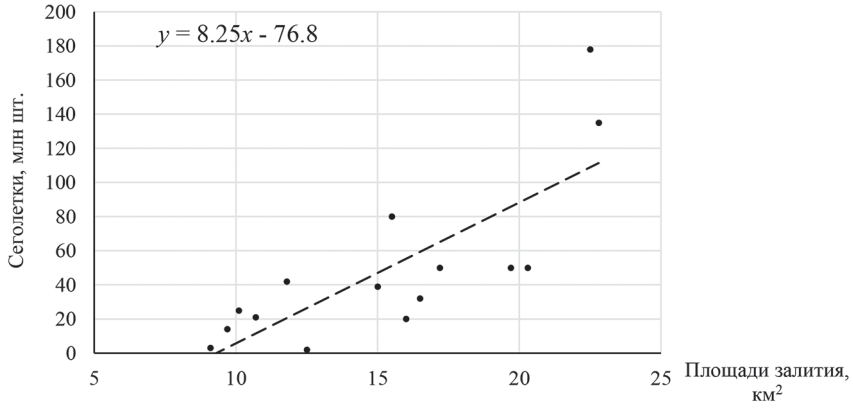


Рис. 7. Связь между площадью залития поймы в районе ГП Раздорская и численностью сеголеток леща (сеголетки из [3]).
Fig. 7. The relationship between the floodplain area near the Razdorskaya hydrological post and the number of bream fingerling youngsters (from [3]).

На рис. 8 видно, что весь временной ряд может быть условно разделен на два периода: многоводный, предшествовавший строительству Цимлянского водохранилища в 1952 году, и маловодный, наступивший после его создания.

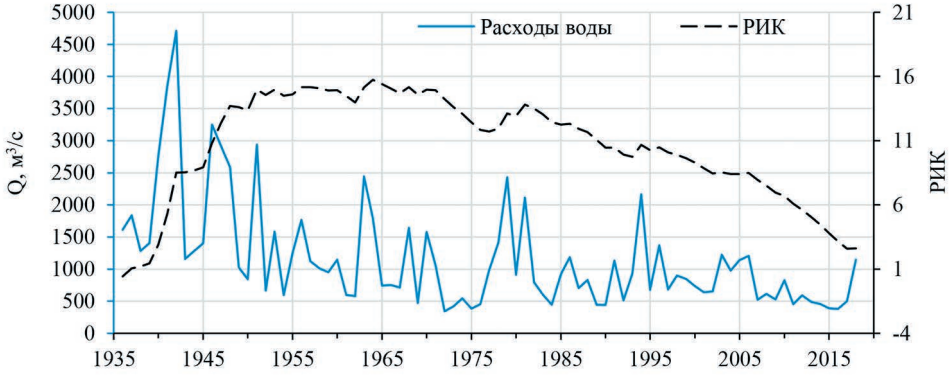


Рис. 8. Наблюденные расходы воды р. Дон на гидрологическом посту Раздорская весной (март – июнь) за 1936–2018 гг.
Fig. 8. Observed water consumption of the Don River at the Razdorskaya hydrological site in the spring (March – June) for 1936–2018.

В каждом периоде можно выделить отдельные короткие фазы. Многоводные: с 1936 по 1952 г., с 1977 по 1982 г.; маловодные: с 1971 по 1976 г. (данная фаза выделена также в [16] и [17]), с 1983 по 2018 г.

Глобальное маловодье, начавшееся в 1970-х годах (рис. 8), связано с глобальным потеплением климата [17]. Наиболее многоводными за весь рассматриваемый период годами являлись 1942 (с расходом воды 4 711 м³/с), 1946 (3 252), 1951 (2 938), 1963 (2 442), 1979 (2 429), 1981 (2 113), 1994-й (2 164) (рис. 8). Наиболее маловодными были годы: 1952 (с расходом воды 666 м³/с), 1954 (597), 1962 (580), 1969 (471), 1972 (343), 1984 (444), 2016-й (379) (рис. 8).

В период 1952–2018 гг. работа Цимлянского гидроузла привела к снижению расходов воды в весеннее время в среднем в 1,7 раза по сравнению с периодом 1936–1951 гг.

На рис. 9 представлены восстановленные расходы воды (станица Раздорская) и построенная на их основе РИК (разностно-интегральная кривая). По этим графикам можно выделить 2 периода: многоводный (1936–1971 гг.) и маловодный (1972–2018 гг.). Этот рисунок наглядно показывает климатические изменения, раннее выявленные в исследованиях [8, 12] и произошедшие в бассейне Дона. Расходы воды в маловодный период (1972–2017 гг.) по сравнению с многоводным (1936–1971 гг.) уменьшились в среднем в 1,6 раза.

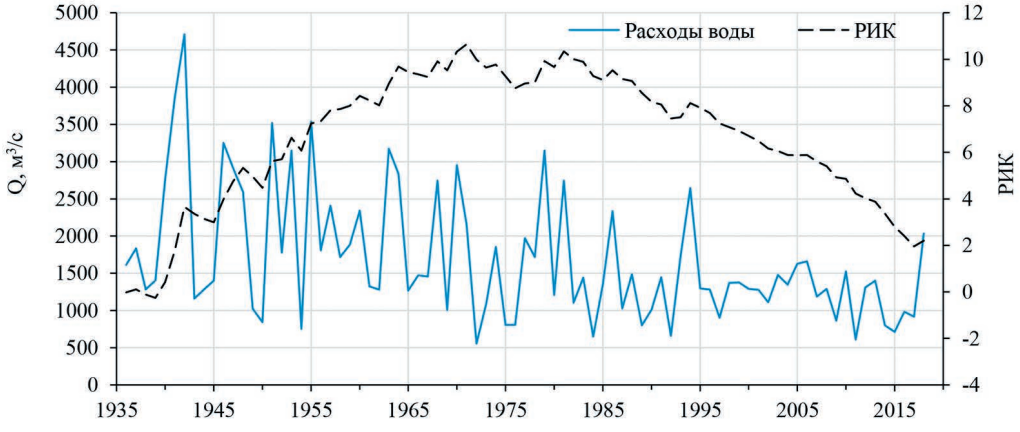


Рис. 9. Восстановленные расходы воды (рассчитанные по гипотетическому сценарию при отсутствии Цимлянского водохранилища) р. Дон на ГП Раздорская весной (март – июнь) за 1936–2018 гг.

Fig. 9. Restored water consumption (that is, the water consumption that would have been in the absence of the Tsimlyansk reservoir) of the Don River at the Razdorskaya hydrological site in spring (March – June) for 1936–2018.

Многолетние изменения площади залития поймы Нижнего Дона в районе гидрологического поста Раздорская с Цимлянским водохранилищем и без него

На рис. 10 представлена диаграмма многолетних изменений площадей залития пойменных нерестилищ Нижнего Дона в створе ГП Раздорская. Как следует из рис. 10, в случае восстановленного стока площади залития пойменных нерестилищ на изучаемом участке в отдельные годы были намного больше, чем при реальной ситуации (с Цимлянским водохранилищем), в 6,2 раза в 1952 г., в 16,4 раза – в 1965 г., в 8,1 – в 1977 г., в 9,4 – в 1999 г., в 9,5 – в 2010 г. Под влиянием климатических изменений площади пойменных нерестилищ сократились в 2,1 раза, т. е. если в период 1936–1971 гг. они составляли 16,1 км^2, то в период 1972–2018 гг. стали составлять 7,8 км^2.

Деградация площадей пойменных нерестилищ на изученном участке является наглядным примером того, что в сложившихся критических условиях необходимо срочно принять меры: регулировать попуски воды с Цимлянско-

го гидроузла весной с учетом требований рыбной отрасли для обеспечения процессов естественного воспроизводства рыб [2, 16–18]; предотвратить использование нерестовых территорий для застройки и других хозяйственных целей [4, 19]; повысить эффективность искусственного воспроизводства рыб.

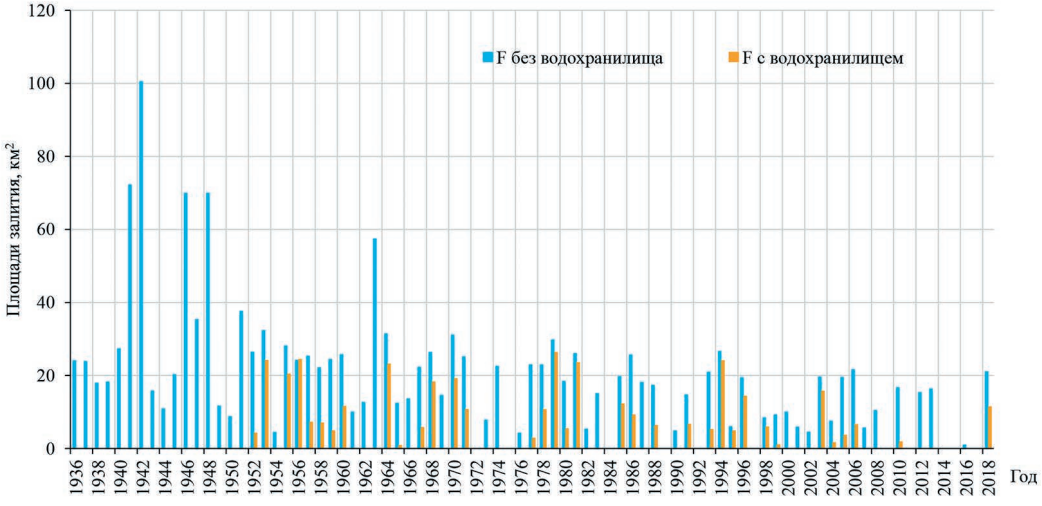


Рис. 10. Площади залития Нижнего Дона в районе ГП Раздорская с Цимлянским водохранилищем и без него (1952-й – год создания плотины Цимлянского водохранилища).
Fig. 10. Areas of the Lower Don with and without the Tsimlyansk reservoir (1952 was the year of the creation of the Tsimlyansk reservoir dam).

ВЫВОДЫ

Показано, что работа Цимлянского гидроузла в период 1952–2018 гг. привела к снижению расходов воды в весеннее время в среднем в 1,7 раза. Расходы воды в результате изменения климата уменьшились в среднем в 1,6 раза.

Под воздействием Цимлянского водохранилища площади пойменных нерестилищ уменьшились в 2,9 раза, а под влиянием климатических изменений – в 2,1 раза. Изменение площадей пойменных нерестилищ напрямую отражается на изменении численности сеголеток полупроходного леща. Коэффициент корреляции между этими показателями составляет 0,78.

В сложившейся ситуации деградации пойменных нерестилищ необходимо: регулировать рыбохозяйственные попуски; запретить использование нерестовых территорий в хозяйственных целях, наладить искусственное воспроизводство рыб.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинина В.Г. Требования рыбного хозяйства при управлении режимами водохранилищ // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 1. С. 67–97.
2. Дубинина В.Г. Гидрологический режим поймы нижнего Дона и проблемы рыбохозяйственного использования водных ресурсов реки: автореф. дис. канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону: РГУ, 1969. 31 с.
3. Иванченко И.Н. Формирование запасов донской популяции леща в условиях антропогенных преобразований Азовского моря: автореф. дис. канд. биол. наук. Ростов-на-Дону, 2004. 26 с.
4. Шинкаренко С.С., Васильченко А.А. Современное состояние нерестилищ нижнего Дона по данным дистанционного зондирования // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2023. Т. 78. № 1. С. 16–27.
5. Воловик Г.С., Воловик С.П., Косолапов А.Е. Водные и биологические ресурсы Нижнего Дона: состояние и проблемы управления: монография. Новочеркасск: СевКавНИИВХ, 2009. 301 с.
6. Белоусов В.Н. Последний рубеж естественного воспроизводства в Азово-Донском районе // Рыбное хозяйство. 2016. № 4. С. 14–19.
7. Жердев Н.А., Власенко Е.С., Гуськова О.С. Распределение молоди тарани rutilus rutilus, леща abramis brama, рыбца vimba vimba, судака sander lucioperca в Нижнем Дону в маловодный 2017 год // Водные биоресурсы и среда обитания. 2020. Т. 3. № 1. С. 42–53.
8. Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 651–662.
9. Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods // Nature. 2019. 573. P. 108–111. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6.
10. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Труды ЦИП. Вып. 66. Л.: Гидрометеоиздат. 1958. 72 с.
11. Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Алентьев Ю.Ю. Особенности длительных фаз повышенного/пониженного стока Енисея (до впадения Ангары) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. Т. 3. № 393. С. 124–141.
12. Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Особенности долговременных фаз повышенной и пониженной водности Дона и Лены в XIX-XXI веках // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 104–114.
13. Беликов В. В., Алексюк А. И., Борисова Н. М., Глотко А. В., Румянцев А. Б. Оценка изменения уровней затопления поймы Нижнего Дона под влиянием хозяйственной деятельности. Ретроспективное гидродинамическое моделирование // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 68–690.
14. Жукова С. В. Обеспеченность водными ресурсами рыбного хозяйства Нижнего Дона // Водные биоресурсы и среда обитания. 2020. Т. 3. № 1. С. 7–19.
15. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 6–23. DOI: 10.35567/19994508-2017-3-6-23.
16. Дубинина В.Г., Лукин А.А., Мартынов А.С., Евланов И.А., Розенберг Г.С., Селезнев В.А. Пленарное заседание научного консультативного совета по комплексному использованию водных ресурсов и охране водных экосистем при участии тематического сообщества по проблемам больших плотин по вопросу: «Оценка влияния строительства и эксплуатации плотин на состояние, сохранение и воспроизводство водных биоресурсов» (25 февраля 2010 г., Москва) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1. С. 296–302.
17. Дубинина В.Г. Рациональное использование водных ресурсов Дона с учетом рыбохозяйственных требований // Водные ресурсы. 1978. № 3. С. 67–82.
18. Дубинина В.Г., Баскакова Т.Е. Обоснование требований рыбного хозяйства к объему, режиму и частоте попусков в нижний бьеф Цимлянского гидроузла // Отчет о НИР АзНИИРХ. Инв. № 7720. Ростов-на-Дону. 1989. 31 с.
19. Дубинина В.Г. Требования рыбного хозяйства при управлении режимами водохранилищ // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 1. С. 67–97.

REFERENCES

1. Dubinina V.G. Requirements of fisheries management in the management of reservoir regimes Ekosistemy: ekologia i dinamika [Ecosystems: ecology and dynamics]. 2019. Vol. 3. No. 1. P. 67–97.
2. Dubinina V.G. Hydrological regime of the floodplain of the lower Don and problems of fishery use of river water resources: abstract of the thesis of the Candidate of Geographical Sciences. Rostov-on-Don: Rostov State University. 1969. 31 p.
3. Ivanchenko I.N. The formation of stocks of the Don bream population in the conditions of anthropogenic transformations of the Sea of Azov: abstract of the thesis of the Candidate of Biological Sciences. Rostov-on-Don. 2004. 26 p.
4. Shinkarenko S.S., Vasilchenko A.A. The current state of the spawning grounds of the Lower Don according to remote sensing data. Vestnik Moskovskogo universiteta [Bulletin of the Moscow University]. Series 5. Geography. 2023. Vol. 78. No. 1. P. 16–27.
5. Volovik G.S., Volovik S.P., Kosolapov A.E. Water and biological resources of the Lower Don: state and problems of management: monograph. Novocherkassk: Sevkavniivkh, 2009. 301 p.
6. Belousov V.N. The last frontier of natural reproduction in the Azov-Don region. Rybnoye khozyaystvo. [Fishery sector]. 2016. No. 4. P. 14–19.
7. Zherdev N.A., Vlasenko E.S., Guskova O.S. Distribution of juvenile taran rutilus rutilus, bream abramis brama, vimba vimba, walleye sander lucioperca in the Lower Don in the low-water year 2017. Vodniye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic bio/resources and habitat]/ 2020. Vol. 3. No. 1. P. 42–53.
8. Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Modern and scenario changes in river flow in the Don basin. Vodniye resursy [Water resources]. 2020. Vol. 47. No. 6. P. 651–662.
9. Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature. 2019. 573. P. 108–111. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6.
10. Kalinin G.P., Milyukov P.I. Approximate calculation of the unsteady movement of water masses. Trudy TsIP [Proceedings of the Central Institute of Forecasts]. Iss. 66. L.: Hydromegeoizdat. 1958. 72 p.
11. Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Barabanova E.A., Alentyev Y.Y. Special features of the Yenisei River increased/decreased runoff prolonged phases (upstream the Angara River inflow) Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy [Hydro/meteorological researches and forecasts]. 2024. Vol. 3. No. 393. P 124–141.
12. Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Special features of the Don River and the Lena River long-term phases of increased and decreased water content in XIX-XXI centuries. Meteorologia i gidrologia [Meteorology and hydrology]. 2023. No. 12. P. 104–114.
13. Belikov V.V., Aleksyuk A.I., Borisova N.M., Glotko A.V., Rumyantsev A.B. Assessment of changes in flood levels of the Lower Don floodplain under the influence of economic activity. Retrospective hydrodynamic modeling. Vodniye resursy [Water resources]. 2022. Vol. 49. No. 6. P. 68–690.
14. Zhukova S.V. Ecological problems and the state of the aquatic. Aquatic bioresources and habitat. 2020. Vol. 3. No. 1. P. 7–19.
15. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Barabanova E.A., Kashutina E.A. Modern and scenario changes in the flow of the Volga and Don. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2017. No. 3. P. 6–23. DOI: 10.35567/19994508-2017-3-6-23.
16. Dubinina V.G., Lukin A.A., Martynov A.S., Evlanov I.A., Rosenberg G.S., Seleznev V.A. Plenary meeting of the Scientific Advisory Council on Integrated use of water resources and protection of aquatic ecosystems with the participation of the thematic community on the problems of large dams on the issue: "Assessment of the impact of dam construction and operation on the condition, conservation and reproduction of aquatic biological resources" (February 25, 2010, Moscow). Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 14. No. 1. P. 296–302.
17. Dubinina V.G. Rational use of Don water resources taking into account fishery requirements. Vodniye resursy [Water resources]. 1978. No. 3. P. 67–82.
18. Dubinina V.G., Baskakova T.E. Justification of the requirements of fisheries for the volume, regime and frequency of releases into the lower reaches of the Tsimlyansk hydroelectric complex. Research report of AzNIIRH. Inv. No. 7720. Rostov-on-Don. 1989. 31 p.

19. Dubinina V.G. Requirements of fisheries management in the management of reservoir regimes. Ecosystems: ecology and dynamics. 2019. Vol. 3. No. 1. P. 67–97.

Сведения об авторах:

Семенова Анна Александровна, аспирант, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID: 0000-0001-5954-2099; e-mail: sem.nut2013@yandex.ru

Гончаров Александр Валентинович, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID: 0000-0001-8737-7625; e-mail: mama15333@mail.ru

Георгиади Александр Георгиевич, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория гидрологии, ФГБУН «Институт географии РАН», 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4; ORCID: 0000-0002-6692-0630; e-mail: georgiadi@igras.ru

Милюкова Ирина Павловна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, лаборатория гидрологии, ФГБУН «Институт географии РАН», 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4; ORCID: 0000-0001-8403-3114; e-mail: milukova@igras.ru

About the authors:

Anna A. Semenova, Postgraduate student, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; ORCID: 0000-0001-5954-2099; e-mail: sem.nut2013@yandex.ru

Alexander V. Goncharov, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; ORCID: 0000-0001-8737-7625; e-mail: mama15333@mail.ru

Alexander G. Georgiadi, Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Hydrology, 119017, Moscow, Staromonetny lane, 29, p. 4; ORCID: 0000-0002-6692-0630; e-mail: georgiadi@igras.ru

Irina P. Milyukova, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Hydrology, 119017, Moscow, Staromonetny lane, 29, p. 4; ORCID: 0000-0001-8403-3114; e-mail: milukova@igras.ru

Поступила в редакцию / Received 11.11.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 06.03.2025.
Принята к публикации / Accepted 30.05.2025.

УДК 546.7 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-64-73*

Региональные предельно допустимые концентрации молибдена для водных объектов бассейна реки Терек

С.Л. Алита, Ф.А. Атабиева

atabieva0812@mail.ru

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Представлен статистический анализ многолетних данных по уровню содержания соединений молибдена – одного из приоритетных загрязняющих веществ двойного генезиса в воде рек бассейна Терека, обоснована разработка региональных предельно допустимых концентраций ($ПДК_{рег}$) по его соединениям. Актуальность исследования объясняется тем, что не всегда концентрации химических веществ в воде поверхностных водных объектов, сформировавшиеся под влиянием природных факторов, соответствуют требованиям гигиенических или рыбохозяйственных нормативов. Разработка и принятие региональных ПДК в таких ситуациях имеет большое значение для улучшения эффективности водоохранных мероприятий. **Методы.** Измерения концентраций растворенных форм соединений молибдена (Mo) проведены с помощью атомно-абсорбционного метода с использованием спектрометра с электротермической атомизацией «МГА-915М». Для расчета регионального ПДК применялись методики, основанные на оценках непараметрических статистических показателей, позволяющие эффективно учитывать объем рассматриваемых статистических выборок и их изменчивость. **Результаты.** Проведен статистический анализ уровня содержания молибдена в реках бассейна Терека – Баксан, Куркужин, Лескен, Малка, Нальчик, Терек, Урвань, Урух, Чегем, Черек, Шалушка – за период 2022–2024 гг. Рассчитанные региональные ПДК для молибдена превышают санитарно-гигиенические и рыбохозяйственные нормативы. Рекомендуется рассчитывать нормативы допустимого сброса для соединений молибдена в водных объектах бассейна р. Терек с учетом разработанных $ПДК_{рег}$ по молибдену.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бассейн реки Терек, соединения молибдена, статистический анализ, региональные показатели, метод Уилкоксона – Манна – Уитни.

Для цитирования: Алита С.Л., Атабиева Ф.А. Региональные предельно допустимые концентрации молибдена для водных объектов бассейна реки Терек // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 64–73. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-64-73, EDN: MBYCA

Regional maximal permissible molybdenum concentrations for water bodies in the Terek River basin

Sergey L. Alita, Fatimat A. Atabieva

atabieva0812@mail.ru

High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

ABSTRACT

Relevance. The objective of the study is statistical analysis of long-term data on the content of molybdenum compounds, one of the priority pollutants of dual genesis, in the water of the rivers of

© Алита С.Л., Атабиева Ф.А., 2025

the Terek River basin and development of regional maximum permissible concentrations (MPC_{reg}) for its compounds. The relevance of the research is explained by the fact that concentrations of chemicals in the water of surface water bodies formed under the influence of natural factors do not always meet the requirements of hygienic or fishery standards. Therefore, the development and adoption of regional MPCs in such situations is of great importance for improving the effectiveness of water protection measures. The object of the study is the rivers of the Terek River basin, that is the Baksan, the Kurkuzhin, the Lesken, the Malka, the Nalchik, the Terek, the Urvan, the Urukh, the Chegem, the Cherek, and Shalushka. **Methods.** Measurement of concentrations of dissolved forms of molybdenum compounds (Mo) was carried out using the atomic absorption method using a spectrometer with electrothermal atomization "MGA-915M". **Results.** A statistical analysis of the molybdenum content in the specified rivers for 2022-2024 was carried out. To calculate the regional MAC, methods were used based on estimates of non-parametric statistical indicators, which allow one to effectively take into account the volume of the statistical samples under consideration and their variability. To calculate the MAC_{reg}, various methods developed by S.A. Patin, D.G. Zamolodchikov, A.P. Lepikhin et al. and RD 52.24.622-2019, developed by the Hydrochemical Institute, were used. The regional MACs for molybdenum calculated using the specified methods exceed the sanitary and hygienic and fishery standards. It is recommended to calculate the permissible discharge standards for molybdenum compounds in the water bodies under consideration taking into account the developed MACreg for molybdenum.

KEYWORDS: rivers of the Terek River basin, Malka, Chegem, Baksan, molybdenum compounds, statistical analysis, regional indicators, Wilcoxon-Mann-Whitney method.

For citation: Alita S.L., Atabieva F.A. Regional maximal permissible molybdenum concentrations for water bodies in the Terek River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 3. P. 64–73. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-64-73, EDN: MBYCA

ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые металлы в водных объектах, концентрации которых превышают ПДК, – это загрязняющие вещества, большинство из которых относятся к 1-му классу опасности. Тяжелые металлы в природных водах не разрушаются, могут менять формы и перераспределяться между составляющими компонентами водного объекта [1, 2]. Источниками загрязнения водных объектов тяжелыми металлами могут быть горнодобывающие предприятия, металлургические комбинаты, гальванические и электротехнические предприятия, полигоны захоронения бытовых и промышленных отходов. Нельзя игнорировать и естественное природное загрязнение водных объектов выветриваемыми горными породами и различными эрозионными процессами на водосборах рек.

В большинстве зарубежных работ загрязнение воды рек тяжелыми металлами объясняется поступлением в них загрязняющих веществ вместе со сточными водами от сбрасываемых в реки без предварительной очистки промышленных стоков и поверхностных стоков сельхозугодий [3–10]. Но если истоки рек расположены в высокогорье и частично они протекают по горной местности, где отсутствуют антропогенные факторы, можно предположить, что уровень содержания соединений тяжелых металлов будет зависеть от склоновых процессов и степени выветривания горных пород и минералов, т. е. загрязнение будет происходить за счет природных факторов. В этой ситуации показатели концентраций некоторых тяжелых металлов могут быть выше общепринятых значений ПДК.

В настоящее время в качестве критериев нормирования качества природных вод суши применяются одинаковые для всей территории России нормативы. Они зависят только от вида водопользования и не учитывают региональные особенности химического состава природных вод, зависящих от климатических, гидрологических, физических, биологических и других процессов, протекающих на водосборной площади. В конечном итоге это приводит к неточной классификации качества воды [11–14]. При оценке качества поверхностных вод одним из показателей является удельный комбинаторный индекс загрязненности (УКИЗВ). Расчет УКИЗВ [15] начинается с определения значения коэффициента комплексности загрязненности воды (К) по формуле:

$$K = \frac{n^*}{n} * 100\ \%, \quad (1)$$

где n^* – количество показателей качества воды, значение которых превышает соответствующие им ПДК;

n – общее число показателей качества воды.

Чем больше показателей превышают соответствующие им ПДК, тем хуже класс качества воды. Если же принять региональные ПДК (в нашем случае для молибдена), то количество показателей, превышающих ПДК, уменьшается и, согласно УКИЗВ, класс, характеризующий качество воды при постоянстве других показателей, меняется в лучшую сторону. Региональные нормативы для веществ двойного генезиса также используются при расчетах нормативов допустимого воздействия.

Целью проведенного исследования являются статистический анализ многолетних данных по уровню содержания соединений молибдена – одного из приоритетных загрязняющих веществ двойного генезиса – в водах рек бассейна Терека и разработка региональных предельно допустимых концентраций ($ПДК_{рег}$) по его соединениям.

Для расчетов $ПДК_{рег}$ использованы различные методы, разработанные С.А. Патиным [15], Д.Г. Замолодчиковым [16], А.П. Лепихиным с соавторами [17], и РД 52.24.622–2019[1].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Истоки исследуемых рек (Баксан, Куркужин, Лескен, Малка, Нальчик, Терек, Урвань, Урух, Чегем, Черек, Шалушка) расположены в ледниках Главного Кавказского, Бокового, Скалистого и Мелового хребтов. Картосхема пунктов отбора приведена на рисунке. Отбор проб воды проводили на каждой реке в двух постоянных створах.

Створ I для каждой реки располагался в предгорной зоне (среднее течение), а створ II – в равнинной части (нижнее течение). Отборы проб воды проведены семь раз (в зимнюю межень, во время половодья – на подъеме, пике и спаде; в период летней межени – при наименьшем расходе и прохождении дождевого паводка и осенью).

[1] РД 52.24.622–2019. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. Ростов-на-Дону, 2019. 95 с.

Отобраны и проанализированы пробы воды 11 рек в 22 постоянных створах. Каждый год брали по 154 пробы воды, за рассматриваемый период (2022–2024 гг.) – 462 пробы. При отборе проб фиксировали время, температуру воздуха и воды, прозрачность воды, минерализацию. Пробы отбирали в полиэтиленовые емкости и хранили в холодильнике при температуре от +2 до +5 °С. В период забора проб воды в зимнюю межень (февраль) температура воды рек варьировала от +2,4 °С до +10,1 °С. Летом (июль) она изменялась от +11,5 °С до +24,9 °С.

Для определения концентраций растворенных форм молибдена пробы воды фильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Полученный фильтрат консервировали азотной кислотой из расчета 0,1 мл на 100 мл пробы воды.

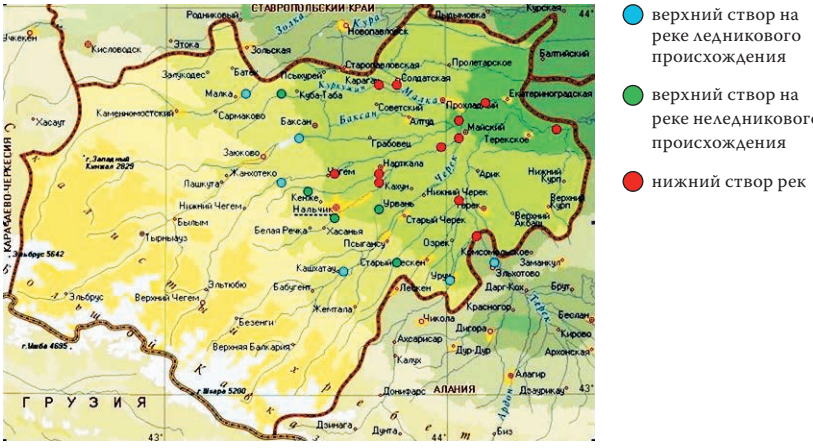


Рисунок. Картосхема пунктов отбора.
Fig. The map diagram of the sampling points.

Измерения проводились с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией «МГА-915М»[2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Территория Северного Кавказа, как отмечено в [18], загрязнена соединениями никеля, цинка, меди, хрома, олова, свинца, а отдельные ландшафты – и соединениями молибдена, вольфрама, марганца, стронция. В естественных условиях ионы металлов поступают в поверхностные воды в основном за счет выветривания, выщелачивания, растворения минералов и пород, слагающих водосборный бассейн. При антропогенном загрязнении соединения тяжелых металлов выносятся в водоемы со сточными водами обогатительных фабрик, металлургических заводов, предприятий химической промышленности и шахтными водами. На исследуемой территории таких предприятий нет, за

[2] Методика выполнения измерений массовых концентраций Al, Ba, Be, V, Fe, Cd, Co, Li, Mn, Cu, Mo, As, Ni, Sn, Pb, Se, Sr, Ti, Cr, Zn в природных и сточных водах методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией «МГА–915». М., 2009. 36 с.

исключением давно законсервированного Тырныаузского горно-обогатительного комбината по добыче и обогащению вольфрамо-молибденовых руд. Тырныаузский горно-обогатительный комбинат и «хвостохранилище» расположены в Баксанском ущелье, по которому протекает р. Баксан, в воде которой зафиксированы максимальные значения молибдена.

Молибден, по результатам многолетних исследований (2020–2024 гг.), является одним из приоритетных загрязняющих веществ двойного генезиса. Результаты получены при выполнении государственной темы «Анализ загрязнения рек Центрального Кавказа тяжелыми металлами и неорганическими соединениями азота по результатам ежегодных наблюдений» в аккредитованной лаборатории ФГБУ «ВГИ» (аттестат аккредитации RA.RU.21АИ34). Для проведения статистической обработки гидрохимической информации выборки проб, взятых в среднем и нижнем течении каждой реки, проверялись на однородность методом Уилкоксона – Манна – Уитни, также в них была произведена фильтрация величин с экстремально низкими и экстремально высокими значениями. Результаты этой проверки представлены в табл. 1.

Результаты расчета квартилей в распределениях концентраций Mo представлены в табл. 2.

Первый и третий квартили (табл. 2) используются для расчетов $ПДК_{рег}$ в формулах Д.Г. Замолодчикова и А.П. Лепихина. Если бы концентрации молибдена в пробах подчинялись нормальному закону распределения, то значения второго квартиля совпадали бы со значениями выборочных средних из табл. 1. Несовпадение указанных значений косвенно свидетельствует о том, что закон распределения концентраций молибдена в воде рек отличается от нормального. В своей работе мы использовали методику, описанную в [17], в которой оперируют точечными показателями, чтобы уйти от особенностей распределения отдельных показателей химического состава воды водных объектов, и за основу приняты квартили определенного порядка с учетом погрешностей их оценки. В расчетах в качестве показателя качества воды используется квартиль порядка 0,75. Предложенное в [19] основное уравнение по оценке фоновой концентрации является частным случаем соотношения в формуле (4).

Далее был проведен сравнительный анализ результатов расчета регионального ПДК молибдена по формулам:

$$\text{С.А. Патина: } ПДК_{рег} = C_{ср} + 2\sigma, \quad (2)$$

$$\text{Д.Г. Замолодчикова: } ПДК_{рег} = ВК + 1{,}5\,(ВК - НК), \quad (3)$$

$$\text{А.П. Лепихина: } ПДК_{рег} = ВК - 2{,}15\,\sigma/\sqrt{N}, \quad (4)$$

где $C_{ср}$ – средняя концентрация в выборке, мкг/дм^3;

σ – стандартное отклонение;

ВК и НК – верхний и нижний квартили распределения проб;

N – объем выборки.

Данные расчетов представлены в табл. 3. В пятом столбце табл. 3 приведены значения фоновой концентрации молибдена в воде рек бассейна Терека, рассчитанные по методике РД 52.24.622–2019.

Таблица 1. Результаты проверки выборок на однородность
Table 1. Results of checking samples for uniformity

Река	Размер выборки	Значения, мкг/дм^3	Хср., СКО
Чегем	38 однородная	3,11; 2,32; 1,50; 0,72; 0,77; 1,41; 2,05; 0,91; 0,23; 0,35; 0,10; 1,39; 2,55; 4,13; 3,65; 2,00; 1,20; 2,49; 2,57; 3,71; 1,15; 0,10; 0,10; 0,58; 3,27; 0,10; 1,12; 2,58; 1,29; 1,88; 3,15; 2,48; 0,79; 3,09; 0,72; 1,25; 1,26; 0,73	1,65 1,15
Куркужин	41 однородная	4,71; 5,27; 2,95; 3,83; 2,65; 5,36; 4,07; 4,94; 5,71; 2,21; 4,06; 0,48; 0,61; 1,02; 2,61; 3,57; 0,75; 8,80; 4,20; 7,50; 5,02; 5,84; 3,78; 2,36; 4,87; 5,99; 4,89; 2,47; 2,63; 4,20; 6,61; 0,10; 3,82; 4,35; 2,84; 5,75; 6,00; 5,55; 3,50; 6,93; 3,70	4,06 1,96
Шалушка	39 однородная	1,65; 1,05; 1,33; 2,14; 0,82; 1,10; 1,24; 3,58; 1,11; 1,32; 2,49; 1,93; 0,81; 1,67; 0,75; 1,37; 1,00; 1,40; 7,59; 0,30; 2,04; 1,30; 1,94; 0,51; 0,10; 1,39; 0,19; 1,81; 2,90; 0,81; 1,24; 1,66; 2,38; 2,17; 5,17; 1,05; 3,65; 3,00; 0,47	1,75 1,41
Урух	37 однородная	2,61; 1,43; 2,19; 0,82; 0,10; 1,05; 0,72; 0,10; 0,10; 0,91; 0,86; 0,10; 0,85; 0,33; 1,99; 2,35; 0,99; 3,00; 0,19; 2,41; 2,71; 1,32; 0,18; 0,76; 1,11; 0,10; 0,48; 2,51; 0,10; 1,05; 0,10; 2,41; 0,60; 2,35; 0,45; 2,23; 3,08	1,21 0,98
Баксан	21 среднее течение	17,20; 18,60; 8,32; 16,00; 7,07; 6,37; 15,97; 13,50; 6,09; 7,30; 8,46; 8,18; 6,75; 15,45; 5,25; 11,13; 4,10; 3,95; 5,50; 8,30; 11,47	9,76 4,59
Черек	40 однородная	5,10; 4,63; 1,49; 3,79; 4,45; 0,47; 0,72; 3,09; 2,26; 2,02; 1,74; 1,44; 1,65; 2,42; 3,22; 1,70; 1,10; 2,90; 0,80; 1,93; 1,70; 8,27; 3,68; 0,10; 2,21; 4,67; 4,90; 2,15; 3,59; 1,99; 0,10; 3,06; 5,47; 2,40; 3,39; 2,53; 0,92; 3,75; 0,88; 1.91	2,61 1,68
Малка	21 нижнее течение	9,19; 9,43; 2,10; 4,05; 3,18; 4,18; 6,59; 3,20; 0,30; 1,78; 2,89; 3,77; 1,85; 5,45; 2,63; 3,44; 1,95; 3,75; 2,25; 5,55; 5,53	3,96 2,33
Терек	32 однородная	2,22; 4,30; 0,60; 1,25; 4,30; 1,41; 2,16; 0,99; 0,90; 1,72; 2,71; 3,58; 2,99; 3,75; 0,96; 1,93; 0,42; 0,18; 1,69; 2,35; 0,10; 3,00; 0,86; 3,43; 1,37; 3,07; 2,23; 2,55; 4,00; 3,50; 1,80; 0,26	2,08 1,26
Нальчик	37 однородная	1,32; 6,82; 1,14; 0,10; 3,49; 2,59; 1,67; 1,45; 3,00; 3,05; 3,17; 3,08; 1,11; 0,50; 4,49; 3,30; 1,50; 0,32; 2,75; 4,48; 1,25; 1,99; 0,74; 4,47; 3,60; 3,41; 1,72; 0,92; 0,10; 2,92; 5,09; 5,00; 3,20; 0,55; 2,80; 4,05; 0,58	2,48 1,63
Урвань	39 однородная	6,79; 3,55; 4,82; 14,96; 15,00; 5,71; 8,48; 2,72; 16,36; 5,63; 0,10; 1,35; 4,18; 0,71; 4,14; 1,10; 2,15; 1,89; 0,70; 10,95; 5,90; 2,68; 14,89; 11,31; 13,18; 8,14; 8,11; 4,77; 12,48; 5,15; 4,23; 2,58; 3,86; 3,81; 2,70; 0,72; 1,28; 4,86; 3,01	5,77 4,62
Лескен	19 нижнее течение	3,35; 4,00; 1,42; 0,10; 3,41; 2,84; 0,93; 2,35; 0,36; 2,51; 1,61; 0,10; 1,97; 0,10; 2,05; 0,62; 2,50; 2,70; 2,05	1,84 1,21

Примечание: ПДК$_{Mo}$ = 1 мкг/дм^3; в последнем столбце табл. 1 в каждой ячейке верхнее значение соответствует среднему значению по выборке, а нижнее – среднему квадратическому отклонению.

Таблица 2. Значения квартилей в распределениях концентраций
Table 2. Quartile values in concentration distributions

Река	I квартиль	II квартиль (медиана)	III квартиль	Межквартильный диапазон
Чегем	0,73	1,34	2,52	1,80
Куркужин	2,65	4,07	5,36	2,71
Шалушка	1,00	1,37	2,14	1,14
Урух	0,33	0,91	2,23	1,90
Баксан	6,37	8,30	13,50	7,13
Черек	1,57	2,24	3,64	2,07
Малка	2,18	3,60	5,49	3,32
Терек	0,98	2,05	3,04	2,06
Нальчик	1,14	2,80	3,60	2,46
Урвань	2,58	4,23	8,14	5,56
Лескен	0,62	2,05	2,70	2,08

Таблица 3. Значения региональных ПДК молибдена (Mo) для рек бассейна Терека, мкг/дм^3
Table 3. Values of regional MPC of molybdenum (Mo) for the rivers of the Terek basin

Река	$ПДК_{рег}$ по (2)	$ПДК_{рег}$ по (3)	$ПДК_{рег}$ по (4)	$C_{фон}$ по РД 52.24.622 – 2019
Чегем	3,95	5,21	2,12	1,97
Куркужин	7,98	9,43	4,70	4,57
Шалушка	4,57	3,85	1,66	2,13
Урух	3,17	5,08	1,88	1,62
Баксан	18,94	24,20	11,35	11,48
Черек	5,97	6,75	3,07	2,94
Малка	8,62	10,46	4,40	4,83
Терек	4,60	6,13	2,56	2,92
Нальчик	5,74	7,29	3,02	3,03
Урвань	15,01	16,48	6,55	7,17
Лескен	4,26	5,82	2,10	2,32

Очевидны значительные расхождения в результатах значений региональных ПДК молибдена (Mo) для рек бассейна Терека в зависимости от метода расчета (табл. 3). Учитывая, что предложенное в РД 52.24.622–2019 уравнение по оценке фоновой концентрации является частным случаем соотношения формулы (4), в качестве оптимального метода расчетов $ПДК_{рег}$ следует рассматривать метод А.П. Лепихина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный статистический анализ полученных концентраций молибдена в воде рек Баксан, Куркужин, Лескен, Малка, Нальчик, Терек, Урвань, Урух, Чегем, Черек, Шалушка за период 2022–2024 гг. показывает, что статистические распределения молибдена существенно отличаются от нормального. Поэтому были использованы различные методы расчетов региональных ПДК

на основе оценок непараметрических статистических показателей. На наш взгляд, метод расчета, предложенный А.П. Лепихиным с соавторами, позволяет, в отличие от других методических подходов, весьма эффективно учитывать объем рассматриваемых статистических выборок и их изменчивость. $ПДК_{рег}$ молибдена в исследованных реках, рассчитанные по этому методу, изменяются от 1,66 до 11,35 мкг/дм^3.

Согласно проведенным расчетам, для молибдена требуется введение региональных ПДК, что позволит использовать их при нормировании допустимых сбросов и улучшить эффективность водоохранных мероприятий.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
2. Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иваницкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 6. С. 3–72.
3. Dwivedi A.K. Researches in water pollution: A review // International Research Journal of Natural and Applied Sciences. 2017. No. 4 (11). P. 118–142.
4. Komijani M., Shamabadi N.S., Shahin K., Eghbalpour F., Tahsili M.R. and Bahram M. Heavy metal pollution promotes antibiotic resistance potential in the aquatic environment. Environmental Pollution. 2021. 1:274:116569. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116569.
5. Fernandez-Luqueno F., López-Valdez F., Gamero-Melo P., Luna-Suárez S., Aguilera-González E.N., Martínez A.I., Pérez-Velázquez I.R. Heavy metal pollution in drinking water – a global risk for human health // African Journal of Environmental Science and Technology. 2013. No. 7. P. 567–584.
6. Yalcin M.G., Aydin O., Elhatip H. Heavy metal contents and the water quality of Karasu Creek in Nigde, Turkey // Environment Monitoring Assessment. 2008, Feb. 137(1–3):169–78. DOI: 10.1007/s10661-007-9737-8.
7. Kumar V., Parihar R.D., Sharma A., Bakshi P., Singh Sidhu G.P., Bali A.S., Karaouzas I., Bhardwaj R., Thukral A.K., Gyasi-Agyei Y. and Rodrigo-Comino J. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: a meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses // Chemosphere. 2019 Dec. 236:124364. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124364.
8. Emmanuel P.O., Otitoju O. and Ikwebe J. Health risk assessment in relation to heavy metals in water sources in rural regions of South East Nigeria // International Journal of Physical Sciences. 2023. No. 9(6). P. 109–116. DOI:10.5897/IJPS2014.4125.
9. Nizami G., Rehman S. Assessment of heavy metals and their effects on quality of water of rivers of Uttar Pradesh, India: A review // Journal of Environmental Chemical Toxicology. 2018. No. 2 (2). P. 65–71.
10. Davies C.I., and Ekperusi A.O. Geospeciation, toxicological evaluation and hazard assessment of trace elements in superficial and deep sediments // Environment Science: Pollution Research International. 2020. No. 27(13):15565–15583. DOI: 10.1007/s11356-020-07784-7.
11. Возняк А.А., Лепихин А.П. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // Географический вестник, 2018. № 2 (45). С. 103–115. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-2-103-115.
12. Тимофеева Л.А., Фрумин Г.Т. Проблема нормирования качества поверхностных вод // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 38. С. 215–229.

13. Селезнёв В.А., Селезнёва А.В., Беспалова К.В. Разработка бассейновых нормативов качества воды (на примере водных объектов нижней Волги) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 2. С. 42–53. DOI: 10.35567/1999-4508-2013-2-42-53.
14. Атабиева Ф.А., Отарова А.С. Содержание тяжелых металлов в воде рек Центрального Кавказа (бассейн реки Терек) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 89–101. DOI: 10.35567/19994508-2023-3-89-101.
15. Патин С.А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана. М.: Пищевая промышленность, 1979. 304 с.
16. Замолодчиков Д.Г. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. Т. 15. 289 с.
17. Веницианов Е.В., Мирошниченко С.А., Лепихин А.П., Губернаторова Т.Н. Разработка и обоснование региональных показателей качества воды по содержанию тяжелых металлов для водных объектов бассейна Верхней Камы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 3. С. 50–64. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-3-50-64.
18. Дьяченко В.В. Геохимия и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа: автореф. дис. д-ра геогр. наук. Новороссийск, 2004. 326 с.
19. РД 52.24.622 – 2019 Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. Ростов-на-Дону, 2019. 95 с.

REFERENCES

1. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarkes of chemical elements as comparison standards in eco/geochemistry. *Bulletin of Moscow University*. Ser. 5. Geography. 2015. No. 2. P. 7–17.
2. Yanin E.P., Kuzmich V.N., Ivanitsky O.M. Regional natural heterogeneity of the chemical composition of surface waters on land and the need to take it into account when assessing their ecological state and the intensity of technogenic pollution. *Problems of the environment and natural resources*. 2016. No. 6. P. 3–72.
3. Dwivedi A.K., Researches in water pollution: A review. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*. 2017. 4 (11). P. 118–142.
4. Komijani M., Shamabadi N.S., Shahin K., Eghbalpour F., Tahsili M.R. and Bahram M. Heavy metal pollution promotes antibiotic resistance potential in the aquatic environment. *Environmental Pollution*. 2021. 1:274:116569. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116569.
5. Fernandez-Luqueno F., López-Valdez F., Gamero-Melo P., Luna-Suárez S., Aguilera-González E.N., Martínez A.I., Pérez-Velázquez I.R.: Heavy metal pollution in drinking water – a global risk for human health. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 2013. 7. P. 567–584.
6. Yalcin M.G., Aydin O., Elhatip H. Heavy metal contents and the water quality of Karasu Creek in Nigde, Turkey. *Environment Monitoring Assessment.* 2008, Feb. 137(1-3):169-78. DOI: 10.1007/s10661-007-9737-8.
7. Kumar V., Parihar R.D., Sharma A., Bakshi P., Singh Sidhu G.P., Bali A.S., Karaouzas I., Bhardwaj R., Thukral A.K., Gyasi-Agyei Y. and Rodrigo-Comino J. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: a meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*. 2019, Dec. 236:124364. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124364.
8. Emmanuel P.O., Otitoju O., and Ikwebe J. Health risk assessment in relation to heavy metals in water sources in rural regions of South East Nigeria. *International Journal of Physical Sciences*. 2023. 9 (6). P. 109–116. DOI: 10.5897/IJPS2014.4125.
9. Nizami G., Rehman S. Assessment of heavy metals and their effects on the quality of water of rivers of Uttar Pradesh, India: A review. *Journal of Environmental Chemical Toxicology.* 2018. 2 (2). P. 65–71.
10. Davies C.I. and Ekperusi A.O. Geospeciation, toxicological evaluation and hazard assessment of trace elements in superficial and deep sediments. *Environment Science: Pollution Research International*. 2020. 27(13):15565-15583. DOI: 10.1007/s11356-020-07784-7.
11. Voznyak A.A., Lepikhin A.P. Development of regional MPCs: necessity, methodology, example. *Geographical Bulletin.* 2018. 2 (45). P. 103–115. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-2-103-115.
12. Timofeeva L.A., Frumin G.T. The problem of standardizing the quality of surface waters. *Scientific notes.* 2015. No. 38. P. 215–229.

13. Seleznev V.A., Selezneva A.V., Bespalova K.V. Development of basin water quality standards (on the example of water bodies of the lower Volga). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013. No. 2. P. 42–53. DOI: 10.35567/1999-4508-2013-2-42-53.
14. Atabieva F.A., Otarova A.S. Heavy Metal Content in River Water of the Central Caucasus (Terek River Basin). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management,* 2023. No. 3. P. 89–101. DOI: 10.35567/19994508-2023-3-89-101.
15. Patin S.A. Impact of Pollution on Biological Resources and Productivity of the World Ocean. Moscow: Food Industry, 1979. 304 p.
16. Zamolodchikov D.G. Problems of Environmental Monitoring and Modeling of Ecosystems. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. Vol. 15. 289 p.
17. Venitsianov E.V., Miroshnichenko S.A., Lepikhin A.P., Gubernatorova T.N. Development and Substantiation of Regional Water Quality Indicators for Heavy Metal Content for Water Bodies of the Upper Kama Basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2015. No. 3. P. 50–64. DOI: 10.355567/19994508-2015-3-50-64.
18. Dyachenko V.V. Geochemistry and assessment of the state of landscapes of the North Caucasus: doctor of geographic sciences thesis: 25.00.23. Novorossiysk, 2004. 326 p.
19. Method of measuring mass concentrations of Al, Ba, Be, V, Fe, Cd, Co, Li, Mn, Cu, Mo, As, Ni, Sn, Pb, Se, Sr, Ti, Cr, Zn in natural and wastewater by atomic absorption spectroscopy using atomicabsorption spectrometer with electrothermal atomization "MGA-915". Moscow. 2009. 36 p.

Сведения об авторах:

Алита Сергей Леонидович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, 360001, КБР, г. Нальчик, пр-т Ленина, д. 2; ORCID: 0000-0001-7424-5834; e-mail: alitasergei@eandex.ru

Атабиева Фатимат Адраевна, канд. хим. наук, руководитель испытательного лабораторного центра, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, 360001, КБР, г. Нальчик, пр-т Ленина, 2; ORCID: 0000-0002-4452-0310; e-mail: atabieva0812@mail.ru

About the authors:

Sergey L. Alita, Candidate of Physical/mathematical Sciences, Senior Researcher, High Mountain Geophysical Institute, pr. Lenina, 2, Nalchik, 360001, Russia; ORCID:0000-0001-7424-5834; e-mail: alitasergei@eandex.ru

Fatimat A. Atabieva, Candidate of Chemical Sciences, Head, Testing Laboratory Center, High Mountain Geophysical Institute, pr. Lenina, 2, Nalchik, 360001, Russia; ORCID: 0000-0002-4452-0310; e-mail: atabieva0812@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 18.04.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 28.04.2025.
Принята к публикации / Accepted 02.06.2025.

УДК 55.556 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-74-94*

Применение нейросетевого моделирования для идентификации водоемов в бассейнах рек по данным дистанционного зондирования Земли

Н.А. Душенко ✉, М.М. Головачева, М.В. Капустин, К.С. Суртаева

✉ dushenko-natali@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Эффективность государственного управления водными ресурсами в значительной степени определяют полнота и актуальность информации о водных объектах бассейнов рек. В статье представлена методология сегментации водоемов в бассейнах рек по данным дистанционного зондирования Земли из космоса с применением нейронных сетей и определения с помощью полученных результатов площадей водоемов и объемов потерь на дополнительное испарение с их поверхности в бассейне р. Урал. **Методы.** Сегментация водоемов на космоснимках с применением сверточных и трансформерных нейросетевых моделей. **Результаты.** Приведены основные результаты обучения и сравнения эффективности сверточной и трансформерной нейронных сетей, сегментирующих водные объекты. С помощью наиболее эффективной нейронной сети осуществлена сегментация данных дистанционного зондирования Земли для российской части трансграничного бассейна р. Урал. Проведен анализ количества водоемов и их суммарной площади, идентифицированных с помощью трансформерной нейронной сети, а также объемов потерь на дополнительное испарение с их поверхности. Сформирована база данных сведений о водоемах в разрезе бассейновых округов, бассейнов рек, водохозяйственных участков, административно-территориальных единиц, а также сведений о местоположении водоемов и их площадях, слоях осадков и испарения с водной поверхности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нейронная сеть, сверточная нейронная сеть, трансформерная нейронная сеть, данные дистанционного зондирования Земли, идентификация водной поверхности, семантическая сегментация.

Для цитирования: Душенко Н.А., Головачева М.М., Капустин М.В., Суртаева К.С. Применение нейросетевого моделирования для идентификации водоемов в бассейнах рек по данным дистанционного зондирования Земли // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 74–94. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-74-94, EDN: XFFMVA

Application of neural network modeling for identification of water bodies in river basins using Earth satellite remote sensing data

Natalia A. Dushenko ✉, Maria M. Golovacheva, Mikhail V. Kapustin, Kristina S. Surtayeva

✉ dushenko-natali@mail.ru

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

© Душенко Н.А., Головачева М.М., Капустин М.В., Суртаева К.С., 2025

ABSTRACT

Relevance. The effectiveness of state management of water resources largely depends on the completeness and relevance of information about the water resources of river basins. The article presents a methodology of water bodies' segmentation in river basins according satellite Earth remote sensing data with application of neural networks and determination, with the use of the obtained results, water bodies' areas and volumes of losses caused by additional evaporation from their surface in the Ural River basin. **Methods.** Segmentation of water bodies on satellite images using convolutional and transformer-based neural network models. **Results.** The main results of training and comparing the effectiveness of convolutional and transformer neural networks for segmenting water bodies are described. Using the most efficient neural network, segmentation of remote sensing data was performed for the Russian part of the transboundary Ural River basin. An analysis was conducted of the number of water bodies and their total area identified using the transformer neural network, as well as the volume of losses due to additional evaporation from their surfaces. A database was created containing information about water bodies, categorized by basin districts, river basins, water management units, and administrative-territorial units, as well as data on the location of water bodies, their areas, precipitation layers, and evaporation from the water surface of the water bodies.

KEYWORDS: neural network, convolutional neural network, transformer neural network, Earth remote sensing data, identification of the water surface, semantic segmentation, the Ural River.

For citation: Dushenko N. A., Golovacheva M. M., Kapustin M. V., Surtayeva K. S. Application of neural network modeling for identification of water bodies in river basins using Earth satellite remote sensing data. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 3. P. 74–94. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-74-94, EDN: XFFMVA

ВВЕДЕНИЕ

В регионах с неравномерным в течение года стоком рек и высокой водохозяйственной нагрузкой устойчивое водопользование обеспечивается в значительной мере за счет сезонного и многолетнего регулирования стока в многочисленных прудах и водохранилищах. Сток рек, сохраняемый в прудах и водохранилищах в период половодья, позволяет с минимальными ограничениями обеспечить в период маловодья потребности как крупных участников водохозяйственного комплекса, так и небольших хозяйств.

Одним из основных инструментов планирования и принятия решений по вопросам использования и охраны водных объектов являются водохозяйственные балансы[1], которые позволяют оценить наличие и степень использования водных ресурсов по бассейнам водных объектов и соответствующим территориям субъектов Российской Федерации. Точность расчета водохозяйственного баланса напрямую зависит от полноты и достоверности его составляющих в приходной и расходной частях, при этом информация по многочисленным мелководным водоемам в рамках бассейна реки, как правило, усредняется и формируется на основе справочных показателей или исследований бассейна реки полувековой давности. Несмотря на, казалось бы, незначительность мелководных водоемов для расчета водохозяйственного баланса

[1] Об утверждении Методики расчета водохозяйственных балансов водных объектов. Приказ Минприроды России от 30.11.2007 № 314. Инф.-правовой портал «ГАРАНТ.РУ», 2017. [Электр. ресурс]:URL: www.garant.ru/ (дата обращения: 08.07.2024).

крупных бассейнов рек и определения свободных ресурсов в нем, при прохождении половодья суммарно во множестве таких водоемов задерживается внушительный объем стока, часть которого уходит на нужды водопользователей, часть возвращается в речной сток в течение года, отдельные объемы составляют потери на испарение.

С целью повышения качества расчета водохозяйственных балансов при определении их составляющих целесообразно использовать наиболее достоверные и актуальные источники информации, к которым относятся данные дистанционного зондирования Земли из космоса[2]. При расчете водохозяйственных балансов данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) могут стать источником информации о расположенных в бассейне реки водоемах и их параметрах для учета потерь на испарение с их поверхности. В сравнении с маршрутными обследованиями дистанционное зондирование Земли из космоса не зависит от состояния транспортной инфраструктуры в районе местоположения объекта наблюдения, может обеспечить наблюдения в труднодоступных зонах и позволяет обследовать больше территорий за короткий промежуток времени. Вместе с тем для обработки данных ДЗЗ требуется специализированное геоинформационное программное обеспечение, навыки дешифрирования, существенные временные и трудовые ресурсы. В связи с этим для эффективной обработки данных ДЗЗ на значительных по площади территориях необходимо применять современные методы, автоматизирующие данный процесс, к которым относятся и методы нейросетевого моделирования.

Современные модели нейронных сетей позволяют с высокой скоростью обрабатывать большие объемы неструктурированных данных с множеством параметров, самостоятельно извлекая признаки и зависимости и адаптируясь под любые данные. Таким образом, нейронные сети могут обеспечить более эффективный анализ и интерпретацию данных дистанционного зондирования Земли, автоматизировать процедуры определения водоемов и их параметров.

В современных исследованиях для решения задач сегментации водных объектов на космических снимках используются глубокие сверточные и трансформерные нейронные сети. Их архитектуры демонстрируют высокую эффективность при определении водной поверхности.

Среди отечественных научных публикаций в области применения методов нейросетевого моделирования для семантической сегментации изображений поверхности Земли описывается бинарная сегментация спутниковых снимков: выделение суши и водной поверхности [1], земли и озер [2]. В рамках таких исследований достигалась точность сегментации водной поверхности 96 %, озер – 86 %.

В зарубежных исследованиях наиболее распространена бинарная сегментация с использованием сверточных и трансформерных нейросетевых моделей на основе данных ДЗЗ и искусственно сгенерированных изображений [3], также встречаются и исследования по применению многоклассовой се-

[2] ГОСТ Р 59753-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Термины и определения. М.: ФГБУ РСТ, 2021.

мантической сегментации водных объектов [4]. Отличительной их особенностью является использование снимков высокого разрешения, а также съемок с камер видеонаблюдения [5], что приводит к высокой точности сегментации (90 % и выше). Однако такой подход не предусматривает возможности анализа общедоступных данных ДЗЗ среднего разрешения (около 30 м).

В данной статье представлены результаты сегментации водоемов в российской части бассейна р. Урал по данным ДЗЗ с применением нейронных сетей, основанных на сверточной и трансформерной архитектурах, а также определения их параметров и объемов потерь на дополнительное испарение с поверхности водных объектов.

ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Для обучения нейронных сетей, осуществляющих многоклассовую семантическую сегментацию, подготовка данных выполнялась в несколько этапов:

1. Сбор данных ДЗЗ по бассейнам рек Урал, Дон, Большой и Малый Узень. Источники данных – снимки Landsat-8[3] и Landsat-9[4] с пространственным разрешением 30 м, при облачности не выше 35 %, за период, когда водная поверхность не покрыта льдом, преимущественно в половодье. Для полного покрытия территорий указанных бассейнов без перекрытия облаками и расширения объема обучающей выборки одна и та же территория анализировалась за разные годы.

2. С целью оптимизации подготовки обучающего набора данных использована модель сверточной нейронной сети DeepWaterMap [6]. Ее предсказание представляет собой изображение, каждый пиксель которого имеет вероятность принадлежности к классу водной поверхности (близкие к 1 значения отражают принадлежность объекта к классу «вода») и позволяет на следующих этапах обработки минимизировать ошибку определения водных объектов на космоснимках. Следует отметить, что модель нейронной сети DeepWaterMap прошла обучение на значительном объеме выборки, сформированном с помощью данных ДЗЗ с космических аппаратов серии Landsat, имеет высокие показатели метрики (точность определения водной поверхности порядка 88 %) и не нуждается в дополнительном обучении.

3. Разметка спутниковых снимков на основе полученных на выходе из сверточной нейронной сети DeepWaterMap предсказаний. На этом этапе оператором выделяются 3 класса: 0 – фоновый класс (земная поверхность), 1 – водоток, 2 – водоем. Полученные маски спутникового изображения используются для последующего обучения нейронных сетей.

4. Фрагментирование композитных шестиканальных спутниковых снимков, предсказаний DeepWaterMap и масок до размера 512 × 512 пикселей. Композитные снимки представляют набор растровых данных в следующих спектральных каналах: красном, зеленом, голубом, ближнем инфракрасном и двух коротковолновых инфракрасных.

[3] Landsat Missions. Landsat 8. [Электр. ресурс]. URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8 (дата обращения: 16.03.2024).
[4] Landsat Missions. Landsat 9. [Электр. ресурс]. URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9 (дата обращения: 16.03.2024).

5. Добавление к шестиканальному спутниковому снимку седьмого канала – предсказания DeepWaterMap.

6. Осуществление нормализации пикселей изображений, позволяющей сопоставлять данные между собой, независимо от их исходного диапазона значений, посредством центрирования и масштабирования значений пикселей.

7. Расширение обучающей выборки за счет дублирования данных с применением геометрического преобразования и цветовой коррекции изображений.

На этапе обработки получено 250 космоснимков, которые сформированы в обучающий, тестовый и валидационный наборы данных. Обучающий набор данных необходим для обучения модели, валидационный служит для подбора оптимальных гиперпараметров и проверки работоспособности модели оператором, тестовый набор создается для оценки качества сегментации водоемов. Размер обучающей выборки составляет 80 % от имеющихся снимков, валидационной – 10 %, тестовый – 10 %.

Для сегментации водоемов обучены две нейросетевые модели: сверточная (MobileNetV3-Large LR-ASPP) [7] и трансформерная (EfficientNet–MANet) [8]. Выбор сверточных и трансформерных нейросетевых моделей объясняется их направленностью на работу с изображениями в задачах семантической сегментации.

MobileNetV3-Large LR-ASPP – легковесная глубокая сверточная нейронная сеть, специально разработанная для задачи семантической сегментации. Архитектура MobileNetV3-Large используется в качестве основы нейронной сети, а LR-ASPP является декодером[5] – частью архитектуры нейронной сети, использующейся для восстановления исходного изображения после операций свертки (рис. 1).

EfficientNet–MANet – глубокая трансформерная нейронная сеть, которая использует механизмы внимания для улучшения качества сегментации и распознавания объектов в изображениях. В качестве основной архитектуры применяется MANet, энкодером[6] является EfficientNet (рис. 2).

На вход сверточной нейронной сети MobileNetV3-Large LR-ASPP подаются изображения размером 512 × 512 с 7 каналами. Параметры W и H являются шириной и высотой изображения, изменяющимися в ходе операций свертки. Данная архитектура использует слои:

– для изменения изображения с помощью ядра свертки, выявляя признаки для дальнейшего анализа (Conv – слой свертки);

– преобразования линейной комбинации входных данных с весами в диапазон значений между 0 и 1, что позволяет моделировать недостающие нелинейности в данных (Sigmoid – слой активации);

– увеличения данных с целью сбалансирования классов (Multiclass Upsample – слой сэмплинга);

[5] Компонент нейронной сети, восстанавливающий исходное изображение после выполнения операций свертки и сжатия.

[6] Компонент нейронной сети, отвечающий за извлечение и сжатие характеристик исходного изображения.

– уменьшения пространственных размеров входного изображения путем замены каждой области на ее среднее значение (Avg-Pool – слой субдискретизации).

На выходе нейронной сети полученное изображение имеет размер 512 × 512 с 3 каналами.

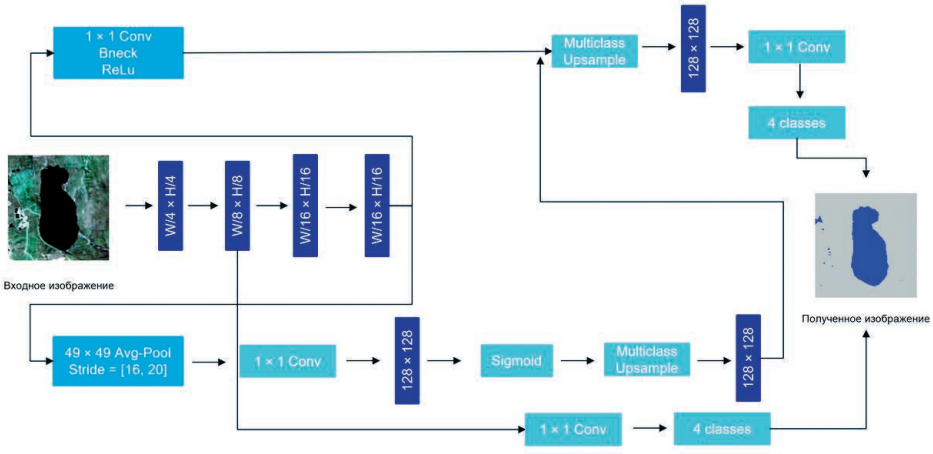


Рис. 1. Архитектура MobileNetV3-Large LR-ASPP.
Fig. 1. MobileNetV3-Large LR-ASPP architecture.

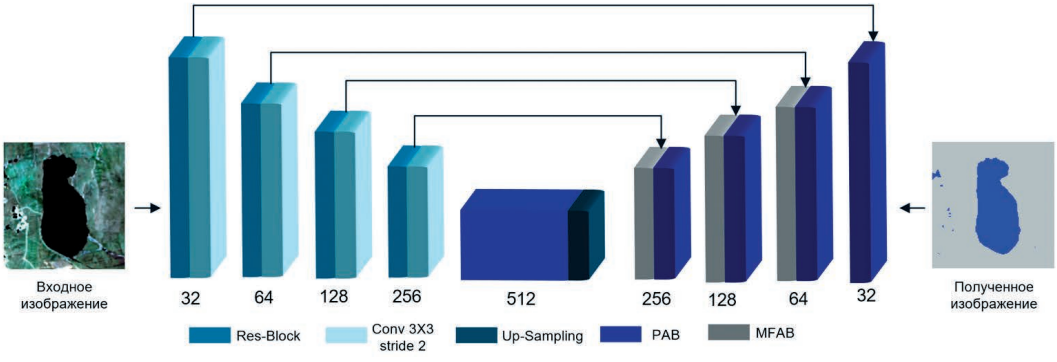


Рис. 2. Архитектура EfficientNet–MANet.
Fig. 2. EfficientNet–MANet architecture.

На вход трансформерной нейронной сети EfficientNet–MANet подается изображение с аналогичными размерами (512 × 512 × 7). Отличительной особенностью трансформерной нейронной сети является совместное применение операций свертки с механизмом внимания, позволяющим учитывать локальные и глобальные зависимости между всеми элементами входных данных. Представленная архитектура состоит из блоков, каждый из которых включает следующие слои:

– Res-Block (слои свертки, активации, групповой нормализации);
– Conv (слои свертки);
– Up-Sampling (деконволюционные слои);

– PAB (слои свертки, активации, механизм внимания);

– MFAB (слои свертки, активации, субдискретизации, полносвязные, механизм внимания).

В ходе обучения сверточной и трансформерной нейронных сетей осуществлялся подбор гиперпараметров (табл. 1), выбор которых основан на экспериментах и анализе полученных результатов. При данных значениях гиперпараметров достигнута высокая точность сегментации водоемов с учетом имеющихся ресурсов и целей.

Таблица 1. Гиперпараметры нейронных сетей
Table 1. The neural networks hyper-parameters

Гиперпараметр	MobileNetV3-Large LR-ASPP	EfficientNet–MANet
Размер батча	64	20
Размер обучающей выборки	80 %	80 %
Размер валидационной выборки	10 %	10 %
Размер тестовой выборки	10 %	10 %
Коэффициент скорости обучения[7]	0,0001	0,001
Оптимизатор[8]	NAdam	Adam
Функция потерь[9]	CrossEntropyLoss	CrossEntropyLoss
Количество эпох	50	50

Для оценки эффективности нейросетевых моделей использована метрика Intersection over Union (IoU). Ее значение в диапазоне от 0 до 1 показывает, насколько у объектов совпадает истинная и предсказанная площадь пересечения, и позволяет оценить точность сегментации:

$$IoU = \frac{A \cap B}{A \cup B}, \quad (1)$$

где A – площадь пересечения; B – площадь объединения.

В ходе обучения на 250 снимках получены значения IoU, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Значения метрики IoU для водоемов
Table 2. IoU metric values for water bodies

Нейронная сеть	IoU на тренировочной выборке	IoU на тестовой выборке
MobileNetV3-Large LR-ASPP	0,62	0,69
EfficientNet–MANet	0,74	0,84

Еще одним способом оценки эффективности нейронных сетей является матрица ошибок – таблица, где строки соответствуют истинным меткам,

[7] Гиперпараметр, определяющий размер каждого шага обновления весов модели в процессе обучения.
[8] Гиперпараметр, определяющий методы и правила, на основе которых выполняется обновление весов.
[9] Математическая функция, используемая в процессе обучения модели для количественной оценки разницы между предсказанными и фактическими значениями.

а столбцы – предсказанным. Каждая ячейка матрицы содержит количество объектов, отнесенных к соответствующему классу истинных и предсказанных меток (рис. 3, рис. 4).

На обучающей выборке сверточная нейронная сеть верно определяет: 99,94 % объектов, относящихся к фону; 58,09 % объектов, принадлежащих классу «водоток»; 87,22 % объектов, определяемых как водоемы. На валидационной выборке точность по объектам фона практически не изменилась (в пределах 0,02 %), точность по классу «водоток» возросла на 13,71 %, по водоемам точность снизилась до 83,63 %.

На обучающих данных трансформерная нейронная сеть верно определяет: 99,34 % объектов, относящихся к фону; 70,46 % объектов класса «водоток»; 98,13 % объектов, определяемых как водоемы. На валидационной выборке точность по объектам фона снизилась до 67,60 %, по классу «водоток» уменьшилась на 46,96 %, по водоемам незначительно снизилась (в пределах 3–4 %).

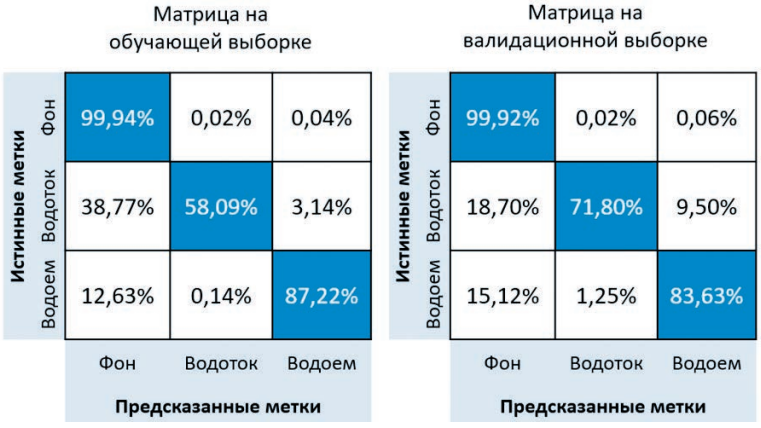


Рис. 3. Матрица ошибок MobileNetV3-Large LR-ASPP.
Fig. 3. MobileNetV3-Large LR-ASPP error metric.

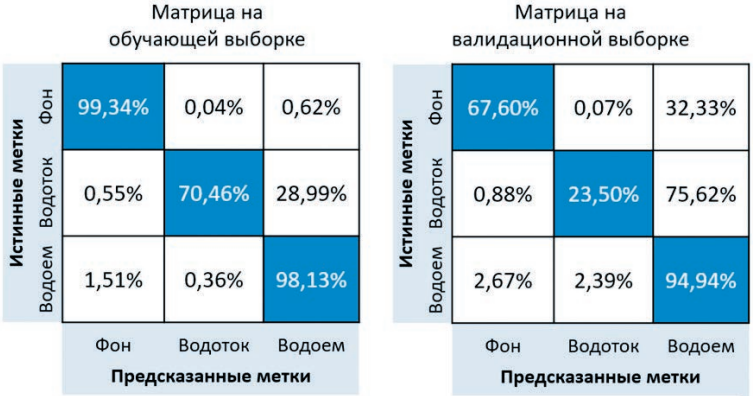


Рис. 4. Матрица ошибок EfficientNet–MANet.
Fig. 4. EfficientNet–MANet error metric.

При детальном сравнении результатов ручного дешифрирования и разметки космоснимков с использованием нейронной сети можно выявить некоторые расхождения, что обусловлено следующими факторами:

– мелководные участки водоемов или небольшие карманы могут быть представлены на космическом снимке в виде пары пикселей, прилегающих к основному водоему, и при разных подходах могут сегментироваться как отдельные объекты либо сливаться с основным водным объектом, в связи с чем при использовании результатов, полученных с использованием нейронной сети, объекты площадью до 0,3 км^2 не учитывались;

– сложность дешифрирования среднего участка р. Урал с огромным количеством наполняемых в половодье пойменных водоемов, которые в пик половодья могут объединяться, образуя внушительные по площади разливы, что требует для определения русла реки изучения архивных снимков за меженный период (рис. 5).



межень половодье

Рис. 5. Пойма р. Урал.
Fig. 5. The Ural River floodplain.

По результатам обучения EfficientNet–MANet оказалась более эффективной в идентификации водоемов на данных ДЗЗ. С использованием этой нейронной сети выполнена сегментация бассейна р. Урал с выделением данных по основным притокам первого порядка: рекам Большой Кизил, Большой Кумак, Губерля, Гумбейка, Илек, Иртек, Орь, Сакмара, Суундук, Таналык, Чаган. Обзорная картосхема бассейна р. Урал с выделением подбассейнов основных притоков первого порядка[10,11], подготовленная на основе цифровой модели рельефа (SRTM) [9] с применением ГИС-технологий[12], приведена на рис. 6.

[10] СТО ГГИ 52.08.40–2017. Определение морфометрических характеристик водных объектов суши и их водосборов с использованием технологии географических информационных систем по цифровым картам Российской Федерации и спутниковым снимкам. М.: РПЦ «Офорт», 2017. 148 с.

[11] Р 52.08.874–2018. Рекомендации. Определение гидрографических характеристик картографическим способом // Mgmtmo.ru. [Электр. ресурс] URL: http://mgmtmo.ru/edumat/rd/52.08.874_2018.pdf (дата обращения: 15.03.2024).

[12] Обзор группы инструментов Гидрология // Pro.arcgis.com: Официальный сайт ArcGIS Pro. [Электр. ресурс] URL: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm (дата обращения: 15.03.2024).

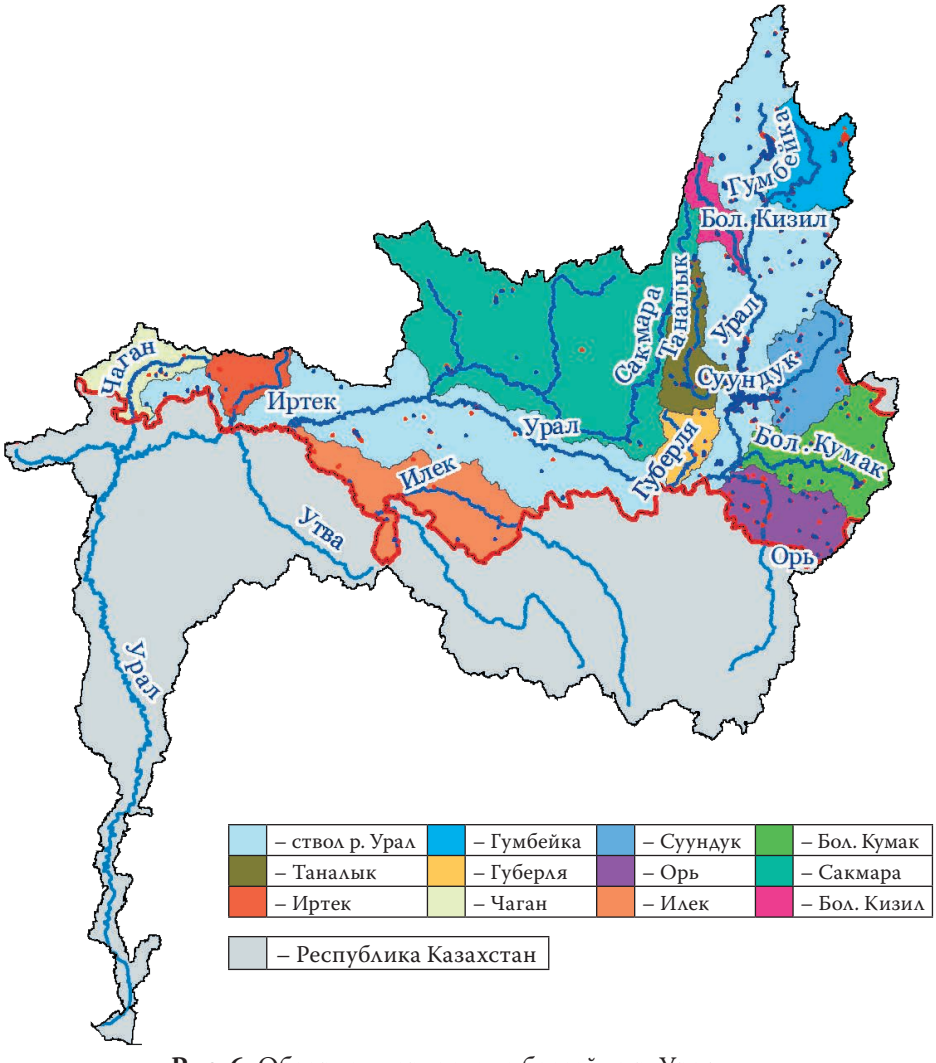


Рис. 6. Обзорная картосхема бассейна р. Урал.
Fig. 6. An overview schematic map of the Ural River basin.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВОДОЕМОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

На основе полученных при анализе космоснимков данных с помощью нейронной сети EfficientNet–MANet подготовлены картографические материалы с отображением идентифицированных в границах бассейнов рек русловых прудов и водохранилищ (рис. 7 – рис. 13). По данным ДЗЗ, в российской части бассейна р. Урал идентифицирован 231 русловой водоем (с площадью зеркала более 0,3 км^2), суммарная площадь зеркала которых составляет 692,81 км^2 в период половодья и 485,79 км^2 в межень. Сводная информация о количестве водоемов и их суммарных площадях по группам приведена в табл. 3.

Таблица 3. Количество водоемов и их суммарная площадь в бассейне р. Урал (российская часть), идентифицированных с использованием нейронной сети
Table 3. A number of water bodies and their total area in the Ural River basin (Russian part), identified using a neural network

Бассейн	Количество водоемов, шт. суммарная площадь в половодье/суммарная площадь в межень, км²					Всего	Изменение площади зеркала за год
	группировка водоемов по площади зеркала в половодье, км²						
	[0,3; 1)	[1; 2)	[2; 5)	[5; 10)	> 10		
р. Урал	152 81,19/32,49	38 52,58/25,44	27 77,82/45,54	7 48,22/37,06	7 432,99/345,26	231 692,81/485,79	–30 %
в том числе:							
Ствол р. Урал	50 27,34/12,30	13 18,49/10,77	7 21,23/13,34	3 20,06/18,31	5 404,08/337,34	78 491,20/392,05	–20 %
р. Большой Кизил	2 0,73/0,54	–	1 2,52/1,84	–	–	3 3,25/2,38	–27 %
р. Большой Кумак	14 7,15/2,72	2 2,83/0,96	2 4,19/1,91	–	1 12,69/7,92	19 26,86/13,51	–50 %
р. Губерля	6 3,69/1,47	1 1,08/0,74	–	–	–	7 4,77/2,21	–54 %
р. Гумбейка	8 3,74/2,51	1 1,08/0,79	1 3,39/1,11	1 7,13/5,20	1 16,22/–	12 31,57/9,61	–70 %
р. Илек	9 5,11/0,83	2 2,97/0,35	2 4,99/1,62	–	–	13 13,08/2,80	–79 %
р. Иртек	6 2,38/0,33	1 1,50/–	1 2,32/–	–	–	8 6,2/0,33	–95 %
р. Орь	19 11,42/2,60	7 9,06/1,63	2 5,79/2,87	1 8,40/2,86	–	29 34,67/9,96	–71 %
р. Сакмара	10 4,29/2,42	4 5,82/4,13	2 6,62/4,68	1 5,26/4,67	–	17 21,99/15,89	–28 %
р. Суундук	10 6,56/2,86	5 6,27/3,94	2 5,11/2,98	–	–	17 17,94/9,78	–46 %
р. Таналык	10 4,99/2,90	2 3,47/2,14	6 19,28/13,42	1 7,37/6,03	–	19 35,10/24,49	–30 %
р. Чаган	8 3,81/1,02	–	1 2,37/1,78	–	–	9 6,18/2,80	–55 %

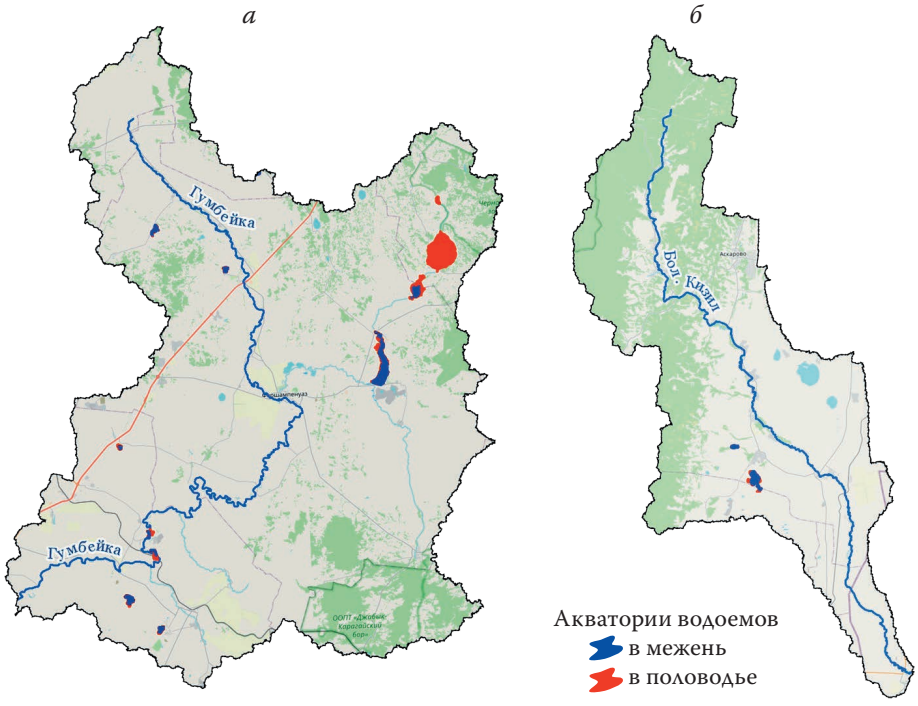


Рис. 7. Картосхемы бассейнов: *а* – р. Гумбейка, *б* – р. Большой Кизил.
Fig. 7. Schematic maps of the basins: *a* – the Gumbeyka River, *b* – the Bolshoy Kizil River.

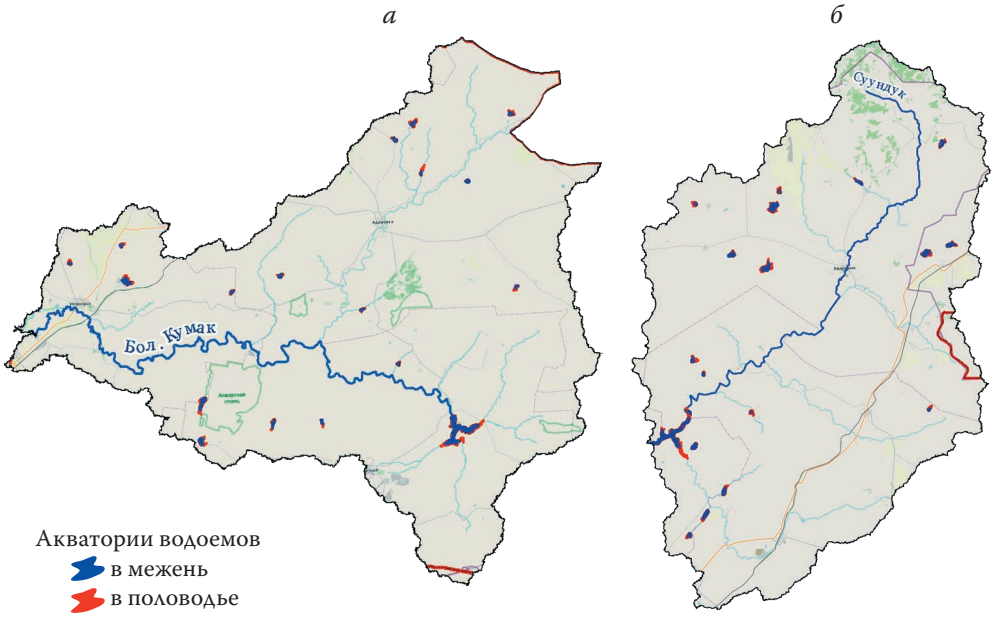


Рис. 8. Картосхемы бассейнов рек: *а* – р. Большой Кумак, *б* – Суундук.
Fig. 8. Schematic maps of the basins: *a* – the Bolshoy Kumak River, *b* – the Suunduk River.

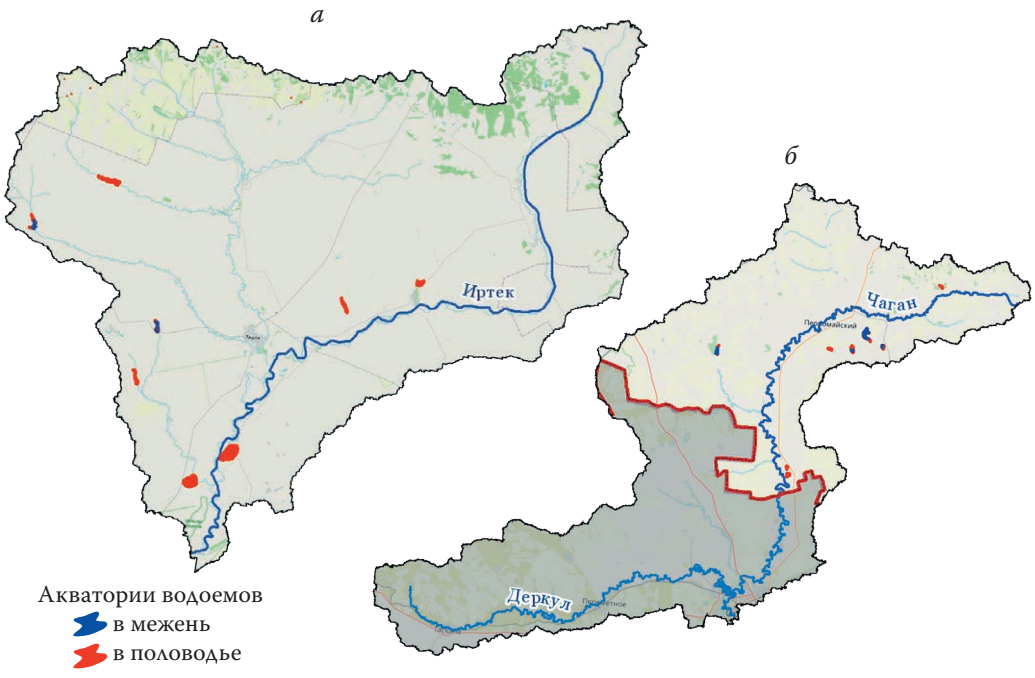


Рис. 9. Картосхемы бассейнов рек: *а* – р. Иртек, *б* – р. Чаган.
Fig. 9. Schematic maps of the basins: *a* – the Irtek River, *b* – the Chagan River.

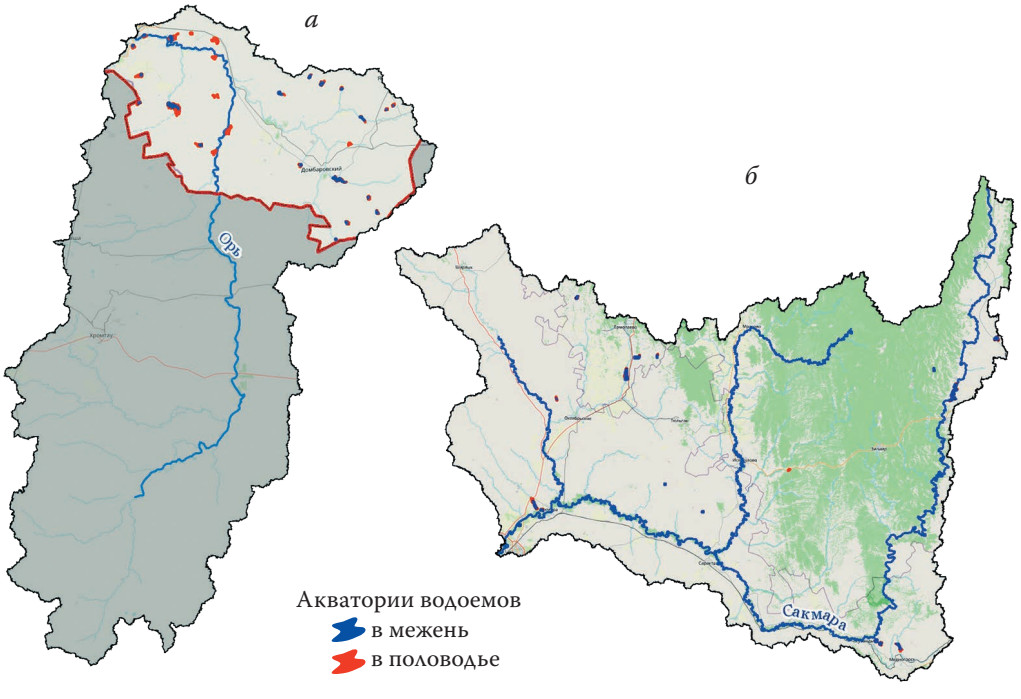


Рис. 10. Картосхемы бассейнов рек: *а* –Орь, *б* – Сакмара.
Fig. 10. Schematic maps of the basins: *a* – the Or River, *b* – the Sakmara River.

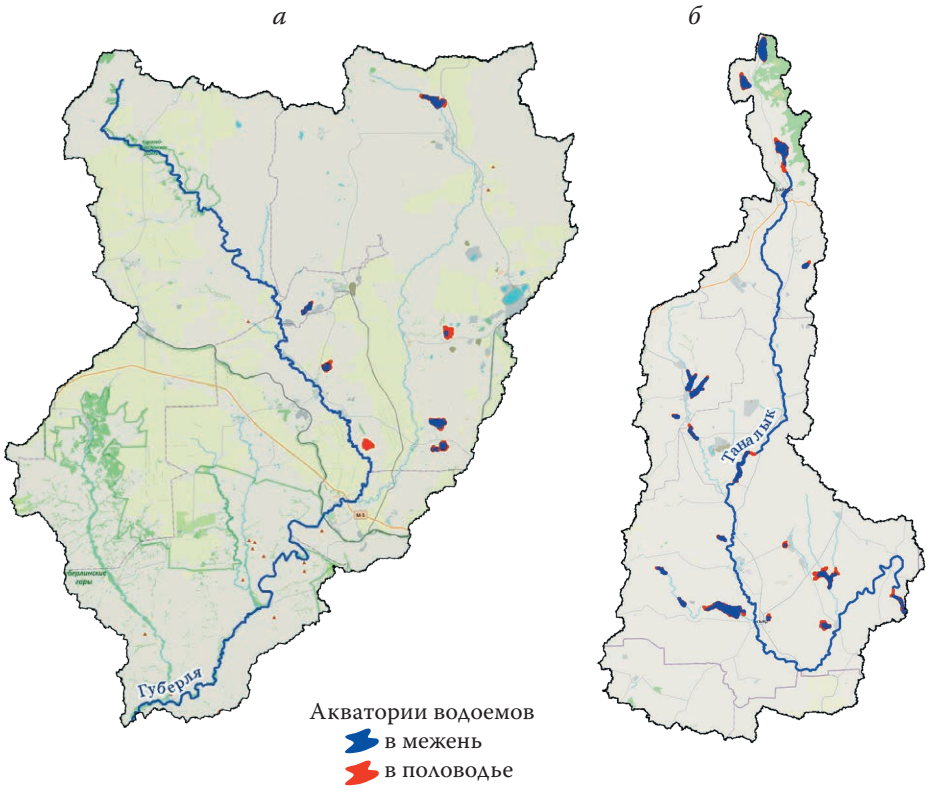


Рис. 11. Картосхемы бассейнов рек: *а* – Губерля, *б* – Таналык.
Fig. 11. Schematic maps of the basins: *a* – the Guberlya River, *b* – the Tanalyk River.



Рис. 12. Картосхема бассейна р. Илек (российская часть)
Fig. 12. Schematic map of the basin the Ilek River (Russian part).

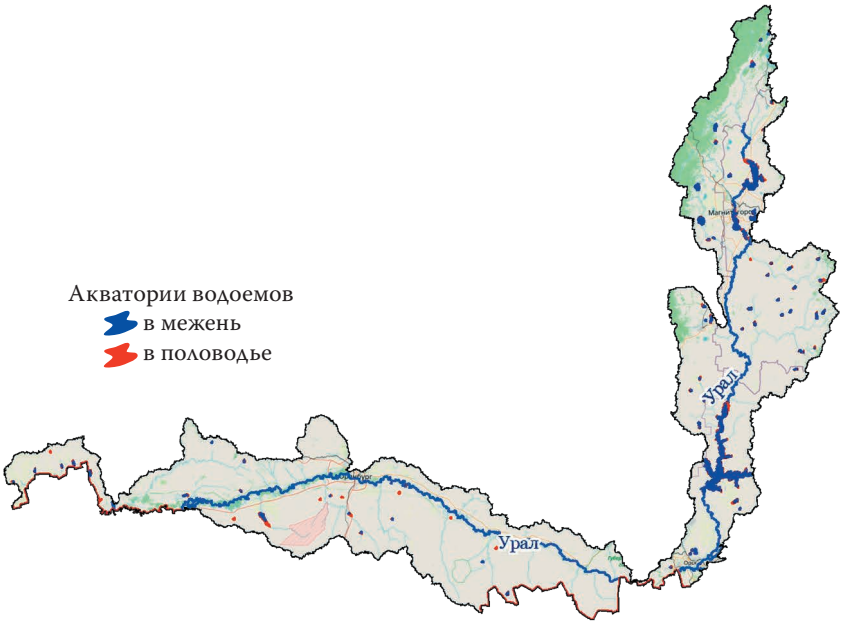


Рис. 13. Картосхема ствола р. Урал (российская часть)
Fig. 13. Schematic map of the Ural River trunk stream (Russian part).

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОЕМОВ

Для расчета потерь на дополнительное испарение с поверхности водоемов отобраны данные о среднем многолетнем слое испарения с водной поверхности за теплый период, с 5-го по 9-й месяц включительно, по испарителю ГГИ-3000 [10], о среднем многолетнем слое скорректированных осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов за аналогичный период по данным наблюдений[13]. Исходные данные представлены в табл. 4 и 5.

С использованием геоинформационных программных средств выполнено интерполирование значений среднего многолетнего слоя испарения с водной поверхности (рис. 14) и скорректированных значений осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов (рис. 15) по методу обратного взвешенного расстояния.

Для каждого основного притока первого порядка р. Урал с учетом средней площади зеркал водоемов, идентифицированных нейронной сетью, определен объем осадков и испарения с водной поверхности. На основе полученных данных рассчитаны потери на дополнительное испарение с водной поверхности по площадям зеркал в разрезе основных притоков первого порядка р. Урал (табл. 6).

[13] Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ – МЦД). [Электр. ресурс]. URL: http://meteo.ru (дата обращения: 03.10.2024).

Таблица 4. Среднее многолетнее испарение с водной поверхности по испарителю ГГИ-3000 по станциям с 5-го по 9-й месяц
Table 4. Average many-year evaporation from water surface according to GGI-3000 evaporator by stations from 5th to 9th months

Станция	Среднее многолетнее испарение с водной поверхности, мм	Станция	Среднее многолетнее испарение с водной поверхности, мм
Аргаяш	512	Росташи	613
Лаишево	522	Оренбург	853
Бирск	560	Нижнедевицк	517
Чишмы	482	Ершов	898
Бугульма	498	Обоянь	599
Верхнеуральск	621	Орск	799
Болхов	505	Каменная степь	573
Красная гора	615	Казанская	593
Мичуринск	509	Серафимович	694
Зилаир	511	Эльтон	1019

Таблица 5. Средние многолетние скорректированные значения осадков с устранением систематических погрешностей по данным наблюдений с 5-го по 9-й месяц
Table 5. Average many-year revised values of precipitation with elimination of systematic errors according to the observation data from 5th to 9th months

Пункт	Средние многолетние значения осадков, мм	Пункт	Средние многолетние значения осадков, мм
Троицк	244,13	Домбаровский	159,79
Златоуст	413,77	Бреды	209,24
Дуван	324,11	Зилаир	259,81
Кушнаренково	260,79	Акбулак	157,21
Аксаково	279,36	Оренбургский	186,03
Стерлитамак	274,84	Серноводск	239,53
Тукан	362,70	Безенчук	219,83
Сорочинск	194,83	Перелюб	185,86
Верхнеуральск	251,76		

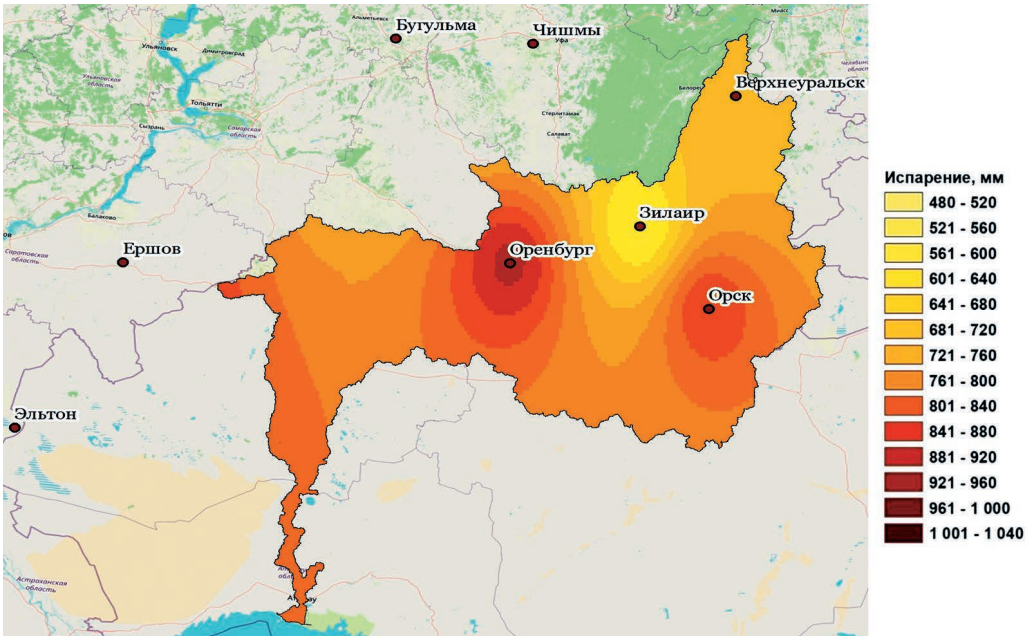


Рис. 14. Среднемноголетний слой испарения с водной поверхности в бассейне р. Урал.
Fig. 14. Average many-year layer of evaporation from water surface in the Ural River basin.

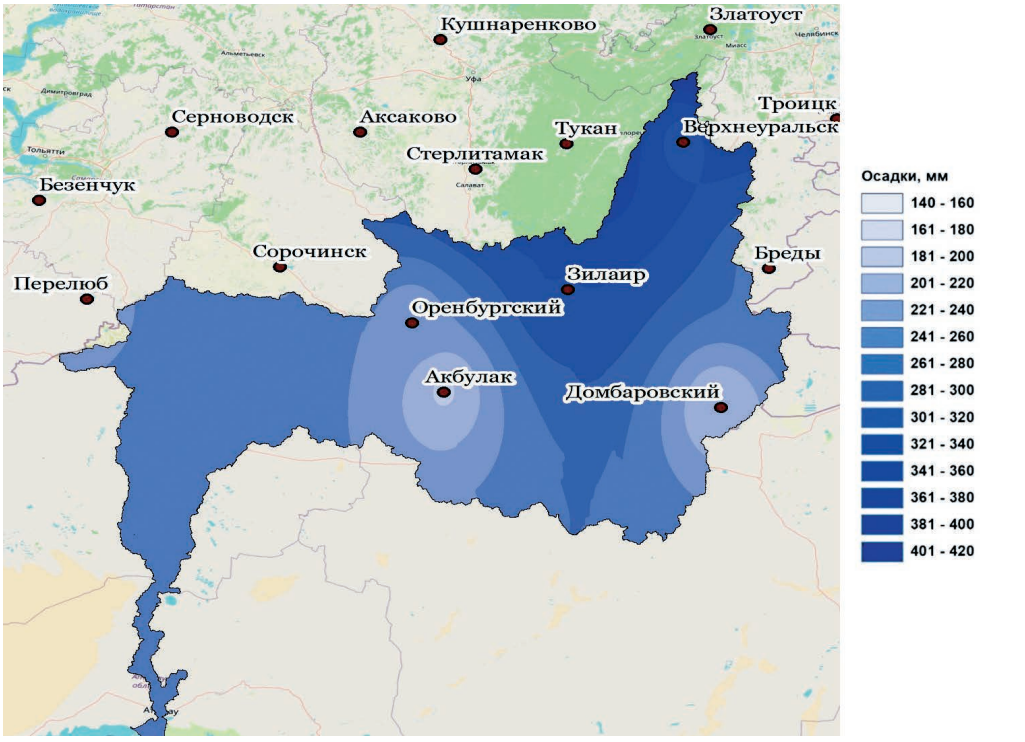


Рис. 15. Среднемноголетний слой скорректированных осадков в бассейне р. Урал.
Fig. 15. Average many-year layer of revised precipitations in the Ural River basin.

Таблица 6. Средние многолетние осадки, испарение с водной поверхности и потери на дополнительное испарение с водоемов в российской части бассейна р. Урал за теплый период (5–9-й месяцы)
Table 6. Average many-year precipitations, evaporation from water surface and losses attributed to additional evaporation from water bodies in the Russian part of the Ural River basin over the warm period (5th – 9th months)

Подбассейн	Площадь водоемов в межень, км^2	Площадь водоемов в половодье, км^2	Средняя площадь, км^2	Объем скорректированных значений осадков, выпавших на поверхность водоемов, млн м^3	Объем испарений с поверхности водоемов, млн м^3	Потери на дополнительное испарение, млн м^3
р. Большой Кизил	2,38	3,25	2,81	0,76	1,73	–0,96
р. Большой Кумак	13,51	26,86	20,19	3,85	14,31	–10,46
р. Губерля	2,21	4,77	3,49	0,83	2,59	–1,76
р. Гумбейка	9,61	31,57	20,59	5,44	12,63	–7,19
р. Илек	2,80	13,08	7,94	1,48	6,06	–4,58
р. Иртек	0,33	6,20	3,27	0,68	2,19	–1,51
р. Орь	9,96	34,67	22,31	4,17	17,11	–12,94
р. Сакмара	15,89	21,99	18,94	4,59	12,30	–7,71
р. Суундук	9,78	17,94	13,86	3,16	9,73	–6,57
р. Таналык	24,49	35,10	29,79	7,72	18,37	–10,65
ствол р. Урал	392,05	491,20	441,63	106,60	300,16	–193,55
р. Чаган	2,80	6,18	4,49	0,95	3,03	–2,09
ИТОГО	**485,79**	**692,81**	**589,30**	**140,23**	**400,19**	**–259,97**

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ВОДОЕМОВ

По результатам обработки данных ДЗЗ с применением наиболее эффективной нейронной сети сформирована база данных, которая содержит информацию о координатах и расположении водоемов относительно бассейновых округов, бассейнов рек, водохозяйственных участков, административно-территориальных единиц, данные о площади водоемов, слоях осадков и испарения с водной поверхности, а также информацию об исходных данных ДЗЗ. Структура базы данных представлена на рис. 16.

Ведение базы данных позволяет формировать массивы данных о водоемах и их параметрах за различные периоды в разрезе бассейновых округов, бассейнов рек, водохозяйственных участков, административно-территориальных единиц и использовать их для расчета водохозяйственных балансов бассейнов рек.

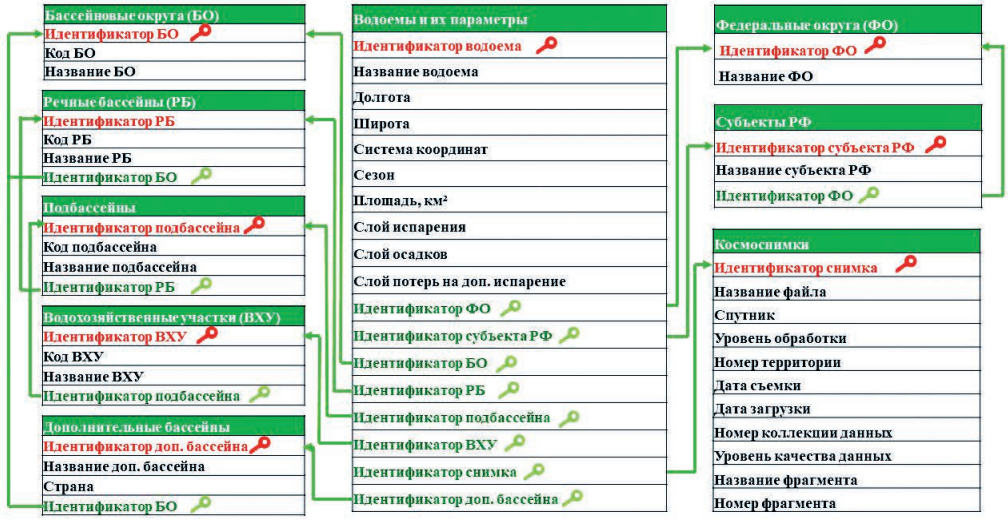


Рис. 16. Структура базы данных водоемов.
Fig. 16. The water bodies' data base structure.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований применения методов нейросетевого моделирования для идентификации водоемов по данным дистанционного зондирования Земли достигнута высокая точность сегментации объектов с характерными признаками водоемов по космоснимкам со средним пространственным разрешением. Применение нейронных сетей имеет существенные преимущества перед методами ручной дешифровки данных дистанционного зондирования Земли по соотношению затраченного времени и качества результатов. Универсальность обученной модели нейронной сети позволяет использовать ее при анализе данных ДЗЗ практически любого бассейна реки за период, когда территория не покрыта снегом, и по сравнению с другими методами обследования территорий при минимальных трудозатратах получать достаточно объективную информацию о количестве водоемов, их расположении и параметрах.

Сформированная по результатам обработки данных ДЗЗ с применением нейронной сети информационная база позволяет формировать массивы данных о водоемах и их параметрах за различные периоды по бассейновым округам, бассейнам рек, по водохозяйственным участкам, административным территориям и использовать их в том числе для повышения качества расчетов водохозяйственных балансов.

В перспективе планируется дальнейшее наполнение базы данных по другим бассейнам рек и повышение точности определения водоемов с использованием нейронной сети за счет увеличения объема обучающей выборки и расширения географии территорий обследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krivoguz D. *et al*. A deep neural network method for water areas extraction using remote sensing data // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10. No. 10. P. 1392.
2. Коваленко А. С., Ковалевский В.Н. Детектирование водных объектов по спутниковым снимкам // Применение и развитие нейросетевого моделирования для решения фундаментальных задач в науке и технике: мат-лы Международной молодежной научно-практ. конф., Новочеркасск, 3–4 декабря 2018 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. С. 67–71. EDN: VSJKLK.
3. Pai M. M.M. *et al*. Improved semantic segmentation of water bodies and land in SAR images using generative adversarial networks // International Journal of Semantic Computing. 2020. Vol. 14. No. 1. P. 55–69.
4. Zhang X. *et al*. An Enhanced Dual-Stream Network Using Multi-Source Remote Sensing Imagery for Water Body Segmentation // Applied Sciences. 2023. Vol. 14. No. 1. P. 178.
5. Muhadi N. A. *et al*. Deep learning semantic segmentation for water level estimation using surveillance camera // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 20. P. 9691.
6. Isikdogan F., Bovik A.C., Passalacqua P. Surface Water Mapping by Deep Learning // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017.
7. Howard A., Sandler M., Chu G., Chen L., Chen B., Tan M., Wang W., Zhu Y., Pang R., Vasudevan V. Searching for MobileNetV3. 2019.
8. Fan T., Wang G., Li Y., Wang H. MA-Net: A Multi-Scale Attention Network for Liver and Tumor Segmentation // IEEE Access, 2020. Vol. 8. P. 179656–179665.
9. Джарвис А., Рейтер Х.И., Нельсон А., Гевара Э. Бесшовные данные SRTM с заполнением отверстий, версия 4 // Международный центр тропического сельского хозяйства (CIAT). [Электр. ресурс]. URL: https://srtm.csi. .cgiar.org (дата обращения: 16.03.2024).
10. Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водно-испарительной сети: научно-прикладной справочник / под ред. В.С. Вуглинского. СПб.: РИАЛ, 2021. С. 61–62.

REFERENCES

1. Krivoguz D. *et al*. A deep neural network method for water areas extraction using remote sensing data. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 10. P. 1392.
2. Kovalenko A.S., Kovalevskiy V.N. Detection of water bodies with satellite images. Application and development of neural network modelling for solution of fundamental tasks in science and engineering. *Proceedings of International Youth Scientific-practical conference.* Novocherkassk, December 3–4, 2018. Novocherkassk: OOO "Lik", 2018. P. 67–71. EDN: VSJKLK.
3. Pai M. M.M. *et al*. Improved semantic segmentation of water bodies and land in SAR images using generative adversarial networks. *International Journal of Semantic Computing*. 2020. Vol. 14. No. 1. P. 55–69.
4. Zhang X. *et al*. An Enhanced Dual-Stream Network Using Multi-Source Remote Sensing Imagery for Water Body Segmentation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 14. No. 1. P. 178.
5. Muhadi N. A. *et al*. Deep learning semantic segmentation for water level estimation using surveillance camera. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 20. P. 9691.
6. Isikdogan F., Bovik A.C., Passalacqua P. Surface Water Mapping by Deep Learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017.
7. Howard A., Sandler M., Chu G., Chen L., Chen B., Tan M., Wang W., Zhu Y., Pang R., Vasudevan V. Searching for MobileNetV3, 2019.
8. Fan T., Wang G., Li Y., Wang H. MA-Net: A Multi-Scale Attention Network for Liver and Tumor Segmentation. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 179656–179665.
9. Jarvis A. Reiter, H.I., Nelson A., Gevara E. Джарвис А., Рейтер Х.И., Нельсон А., Гевара Э. The SRTM seamless data with the holes filling, version 4. International Tropical Agriculture Center (CIAT). [Electronic resource]. URL: https://srtm.csi. .cgiar.org (date of address 16.03.2024).

10. Many-year changes of evaporation of the Russia European territory according to the water evaporation network data: scientific/applied reference book / edited by V.S. Vuglinskiy. St. Petersburg.: RIAL, 2021. P. 61–62.

Сведения об авторах:

Душенко Наталья Андреевна, заместитель заведующего отделом применения технологий искусственного интеллекта в управлении водными ресурсами, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344019, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, д. 10а; ORCID: 0009-0005-2988-4895; e-mail: dushenko-natali@mail.ru

Головачева Мария Михайловна, заведующий отделом применения технологий искусственного интеллекта в управлении водными ресурсами, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344019, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, д. 10а; ORCID: 0009-0007-0512-4116; e-mail: mariya_200218@mail.ru

Капустин Михаил Владимирович, заведующий отделом обработки данных и подготовки информационно-аналитических материалов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344019, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, д. 10а; ORCID: 0009-0000-6494-4981; e-mail: kap.miha@mail.ru

Суртаева Кристина Сергеевна, главный специалист отдела применения технологий искусственного интеллекта в управлении водными ресурсами, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344019, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, д. 10а; ORCID: 0009-0000-1125-1014; e-mail: fusewik@outlook.com

About the authors:

Natalia A. Dushenko, Deputy Head of the Department for the Application of Artificial Intelligence in Water Resource Management, Russian Research Institute for integrated water management and protection, 344019**,** Rostov-on-Don, Chentsova street, 10a, ORCID: 0009-0005-2988-4895; e-mail: dushenko-natali@mail.ru

Maria M. Golovacheva, Head of the Department for the Application of Artificial Intelligence in Water Resource Management, Russian Research Institute for integrated water management and protection, 344019, Rostov-on-Don, Chentsova street, 10a, ORCID: 0009-0007-0512-4116; e-mail: mariya_200218@mail.ru

Mikhail V. Kapustin, Head of the Data Processing and Information-Analytical Materials Preparation Department, Russian Research Institute for integrated water management and protection, 344019, Rostov-on-Don, Chentsova street, 10a, ORCID: 0009-0000-6494-4981; e-mail: kap.miha@mail.ru

Kristina S. Surtayeva, The main specialist of the Department for the Application of Artificial Intelligence in Water Resource Management, Russian Research Institute for integrated water management and protection, 344019, Rostov-on-Don, Chentsova street, 10a, ORCID: ORCID: 0009-0000-1125-1014; e-mail: fusewik@outlook.com

Поступила в редакцию / Received 15.01.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 03.02.2025.
Принята к публикации / Accepted 29.05.2025.

УДК 556.18: 001.891 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-95-114*

Водохозяйственная наука: инструментарий определения исследовательских фронтов

Н.А. Валек[1], В.А. Благинин[2], Е.В. Соколова[2]

natfil22@mail.ru

[1] *Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Уральский филиал, г. Екатеринбург, Россия*
[2] *Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Выявление ведущих востребованных научных направлений (связанных с вызовами времени, целями устойчивого развития), подготовка обзоров по мировым тенденциям развития любой области научного знания, отрасли экономики в целом – все это является актуальной научной задачей и имеет практическую значимость для исследователей и организаций, принимающих управленческие решения по финансированию научных проектов. Понимание текущих трендов позволяет определить, какие научные направления заслуживают внимания, какие исследовательские тренды будут оказывать наибольшее влияние на социально-экономическое развитие страны. **Методы.** Библиометрический анализ, анализ больших данных, анализ публикаций с помощью искусственного интеллекта (больших языковых моделей). Предложены способы выявления востребованных научных направлений (исследовательских фронтов) с помощью современного наукометрического инструментария – аналитических инструментов ООО «НЭБ» в базе данных (РИНЦ), нейропоиска и нейросетей, программного обеспечения VOSviewer и Dimensions. **Результаты.** На примере ведущих водохозяйственных изданий выявлены актуальные научные тематики, соответствующие вызовам времени. Акцентирована необходимость постоянного мониторинга ключевых направлений и технологий, развивающихся в мировых топах. Предложен вектор и инструментарий дальнейших исследований по выявлению тенденций развития водного хозяйства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отраслевая водохозяйственная наука, исследовательские фронты, библиометрический анализ, анализ больших данных, анализ публикаций с помощью искусственного интеллекта.

Для цитирования: Валек Н.А., Благинин В.А., Соколова Е.В. Водохозяйственная наука: инструментарий определения исследовательских фронтов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 95–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-95-114, EDN: ZQOSDC

© Валек Н.А., Благинин В.А., Соколова Е.В., 2025

Water science: Suite of tools for identification of research fronts

Natalia A. Valek[1], **Viktor A. Blaginin**[2], **Elizaveta V. Sokolova**[2]

natfil22@mail.ru

[1] *Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Ural Branch, Ekaterinburg, Russia*
[2] *Ural State Economic University, Ekaterinburg, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Detection of leading most demanded scientific directions (connected with the challenges of the moment and the goals of sustainable development), composing of reviews on the global trends of development of any sphere of scientific knowledge or any sector of economy as a hole is an essential scientific task and possess a practical value for researchers and institutions in the process of decision making concerning funding of scientific projects. Comprehension of the current trends enables to identify the most attractive scientific directions and to understand what research trends will mostly influence the social/economic development of the country. **Methods.** The methods included bibliometric analysis, big data analysis, publication analysis with artificial intellect (big language models). We have proposed some methods for revealing scientific directions (research fronts) on demand with the help of modern scientometric suite of tools: analytical tools of OOO "SEL" (Scientific Electronic Library) within the RSCI (Russian Scientific Citation Index) database, neural search and neural networks, as well as VOSviewer and Dimensions software. **Results.** Using leading water publications as an example, we have identified relevant scientific themes that meet the current challenges. We have focused on the necessity of regular non-stop monitoring of key directions and techniques that are developing in the world tops. We propose a vector and a suite of tools for further researches aimed at detection of new tendencies in the water sector development.

KEY WORDS: water sector science, research fronts, bibliometric analysis, big data analysis, publication analysis with artificial intellect.

For citation: Valek N.A., Blaginin V.A., Sokolova E.V. Water science: Suite of tools for identification of research fronts // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 3. C. 95–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-95-114, EDN: ZQOSDC

ВВЕДЕНИЕ

В связи с резким увеличением объема научно-технической информации в последние годы активно развиваются новые способы и инструменты работы с информационными потоками, которые могут оказывать существенную поддержку в уточнении актуальных (ведущих) научных направлений (здесь и далее синонимично использованы дефиниции «фронтиры», «исследовательские фронты»[1], «востребованные направления», «высокоцитируемые направления», «горячие тематики»), исследовательских тематик и малоизученных

[1] Исследовательские фронты как один из трендов развития мировой науки рассмотрены, например, в работах [1–9]. С библиометрических позиций оцениваются научные публикации по отдельным областям научного знания [10–14]. Однако в ходе анализа библиографической литературы мы не обнаружили работ, посвященных наукометрическому анализу водохозяйственного направления.

отраслей научного знания. Одним из самых заинтересованных научных сегментов в данном вопросе выступает специализированная отраслевая наука. Именно она, будучи непосредственно связанной с практической деятельностью, обязана соответствовать запросам времени и максимально быстро реагировать на них, быть мобильной и адаптированной. И именно отраслевая наука способна применять накопленные академические знания и опыт «чистой науки» в практической деятельности, решении социально значимых проблем.

Выявление ведущих научных направлений имеет практическую значимость для исследователей и организаций, лиц, принимающих управленческие решения о финансировании научных проектов, а также той или иной отрасли экономики в целом. Понимание текущих трендов позволит принимать эффективные решения о том, какие тематические научные направления заслуживают внимания органов власти, какие из них будут оказывать наибольшее влияние на социально-экономическое развитие страны. Глобальные вызовы и цели устойчивого развития требуют анализа научных проблем междисциплинарного характера, что, в свою очередь, позволит избежать мелкотемья, в чем отраслевую науку обвиняли уже в советский период[2] [15–17]. Кроме того, обращение к действительно «горячим» тематикам существенно снизит локальность исследований.

В научных трудах по отраслевой водохозяйственной науке остро стоит проблема замкнутости в своей цитатной экосистеме [18]. Это явление (самоцитирование и перекрестное цитирование) снижает видимость и вероятность использования отечественных исследований на международной арене. Очевидно, что переход от имплозии к эксплозии [19] требует ориентации именно на актуальные научные тематики.

Заметим, что поиск и выявление актуальных тематик исследований, соответствующих ведущим мировым трендам и фундаментальным академическим вопросам, вполне коррелирует с Программой фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030), в которой в качестве ключевой задачи обозначено «…обеспечение своевременного распознавания возникающих больших вызовов и формирование приоритетов в рамках научных исследований для ответа на такие вызовы»[3]. В настоящее время определением востребованных исследовательских тематик и направлений в России занимаются различные

[2] Так, реализация программно-целевого принципа планирования и управления отраслевой наукой уже в 1960-е годы натолкнулась на несоответствие сложившейся системы управления, вследствие чего возникла необходимость в структурном оформлении целевого группирования научно-технических организаций. Нарастали негативные тенденции. С одной стороны, это оборачивалось монополизмом, сдерживающим здоровую конкуренцию и развитие связанных с нею преимуществ, с другой, – мелкотемьем. Мелкотемьем «грешил» именно отраслевой научный сектор: росло число сравнительно небольших работ, направленных на совершенствование существующей техники и технологий в ущерб концентрации научных сил на крупных разработках, способствующих революционным техническим сдвигам.

[3] Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030). Утв. распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г., № 3684–р. С. 13.

ведомства. Прежде всего, это Министерство науки и высшего образования Российской Федерации и Российская академия наук. В подготовленных ими стратегических документах задается вектор научно-технологического развития страны в целом и каждой отрасли в частности[4]. Направления развития определяются и в отчетных документах образовательных учреждений высшего образования и научно-исследовательских институтов, Российского научного фонда и иных фондовых структур. В данных документах отражены общие тенденции развития специализированных научных направлений и отраслей.

В качестве примера рассмотрим водохозяйственную отраслевую науку. В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации отмечено, что одним из приоритетных направлений научно-технического развития России является рациональное природопользование, включающее в себя управление водными ресурсами. Подчеркивается необходимость разработки и внедрения новых технологий, которые позволят эффективно использовать ресурсы, предотвращать их загрязнение и истощение, обеспечивать устойчивое развитие водохозяйственного комплекса страны. В Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030) выделено направление «Водные ресурсы, гидрология суши», акцентируется важность их рационального использования для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития государства. Особое место занимает необходимость разработки новых методов и технологий для эффективного управления водными ресурсами, предотвращения их загрязнения и истощения. Предусмотрено проведение фундаментальных исследований по следующим направлениям: изучение гидрологических процессов и состояния водных объектов; прогнозирование гидрологического цикла и опасных гидрологических явлений; научное обеспечение водной безопасности страны; исследование механизмов формирования качества воды и разработка методов его контроля; создание новых материалов и технологий для очистки сточных вод и восстановления водных экосистем. Необходимость соответствия актуальным мировым научным подходам и тематикам в сфере водного хозяйства также определена и в Водной стратегии РФ до 2035 года[5].

[4] Выявление актуальных направлений и приоритетов развития науки и технологий в России отмечается в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, в Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030) определяются основные направления фундаментальных исследований в России на ближайшие годы; в отчетах о результатах деятельности научных организаций анализируются результаты научных исследований, определяются наиболее перспективные направления развития науки.

[5] Так, в качестве важнейших аспектов в Водной стратегии РФ определены: развитие биотехнологий, исследование новых материалов, цифровая трансформация, охрана окружающей среды, борьба с климатическими изменениями, поддержка фундаментальных исследований. Предлагается проводить фундаментальные и прикладные исследования в области гидрологии, гидрогеологии, водных экосистем и других направлений; разрабатывать новые технологии и методы мониторинга, прогнозирования и управления водными объектами; внедрять результаты научных исследований в практику водопользования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В условиях отсутствия доступа к ключевым международным базам данных научного цитирования российским ученым и аналитикам крайне трудно обращаться к высокоцитируемым публикациям, а также использовать инструментарные надстройки, позволяющие достаточно быстро обнаружить «горячие тематики». Тем не менее есть и другие инструменты, позволяющие выявлять востребованные тематики на основе анализа как отечественных, так и зарубежных статей. Это аналитические отчеты по сформированным и формирующимся исследовательским фронтам Clarivate Analytics (Web of Science), портал SCImago Journal and Country Rank, информационно-аналитическая платформа Dimensions и ее надстройки, программное обеспечение VOSviewer, нейропоиск близких по тематике публикаций в РИНЦ на основе нейросети SciRus-tiny[6], иные наукометрические базы данных и представленные на них наукометрические показатели, большие языковые модели (LLM) и другие[7]. Обращение к ним, с нашей точки зрения, позволит ученым более взвешенно и ориентированно подходить к выбору научных направлений исследований.

Методы обнаружения исследовательских фронтов – библиометрический анализ, анализ больших данных, анализ публикаций с помощью искусственного интеллекта (больших языковых моделей).

В результате обработки массивов данных возможно получить новые данные о трендах развития отрасли, неизученных или узкоспециализированных областях водохозяйственной науки, перечни востребованных тематик, сделать прогноз о формирующихся исследовательских фронтах.

Практическая значимость выявления исследовательских фронтов заключается в следующих положениях:

– это необходимая информационно-исследовательская база для новых открытий, развития новых технологий и востребованных научных продуктов;

– изучение фронтиров позволяет быть в курсе последних достижений науки и техники;

– исследования по передовым тематикам повышают престиж конкретного исследователя, организации, научной отрасли и страны в целом.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ФРОНТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ НАУКИ

Необходимо учитывать тот факт, что актуальные тематики научных исследований различаются на международном, национальном и региональном уровнях. С учетом различного масштаба ученые решают задачи, в которых отражена территориальная специфика. Авторы ставят задачу не только поиска исследовательских фронтов водохозяйственной науки, но и обнаружения специфической для отечественных исследований направленности, что

[6] https://huggingface.co/mlsa-iai-msu-lab/sci-rus-tiny.

[7] Актуальные темы можно выявлять также с помощью специализированных научных журналов и конференций, научных социальных сетей и платформ (сервисов ResearchGate, Mendeley, Academia.edu и др.); с помощью библиотек и архивов научных публикаций; поисковых систем наподобие Google Scholar, а также собственных исследований и анализа данных.

предполагает углубленный анализ как отечественных, так и международных тематических направлений.

В число топовых тематик, относящихся к сфере водного хозяйства, согласно последнему отчету об исследовательских фронтах за 2024 год, вошла тема «Обнаружение SARS-CoV-2 в сточных водах и эпидемиологический надзор за COVID-19 на основе сточных вод»[8]. Для сравнения, в 2023 году востребованными были следующие темы: «Адсорбция загрязняющих веществ на частицах микропластика»; «Обнаружение SARS-CoV-2 в сточных водах и эпидемиологический надзор за COVID-19 на основе сточных вод»; «Экологическая судьба и влияние на окружающую среду, экологическая токсичность микропластика в почвах»; «Глобальный кризис биоразнообразия пресноводных ресурсов и последствия строительства плотин»; «Тенденции и источники глобальных выбросов метана»; «Теория "Nature-основанные решения" и ее применение»[9]. Таким образом, высоко востребованными направлениями исследований были работы, сфокусированные на проблемах, связанных с изменением климата, загрязнением озонового слоя, а также на инновационных решениях или новых областях знаний, таких как новые технологии борьбы с загрязнением воды и экологическая эпидемиология. Отметим, что научные труды по загрязнению окружающей среды микропластиком в последнее десятилетие занимали центральное место в водохозяйственной науке и неоднократно входили в исследовательские фронты.

Оценим национально значимые академические направления. С помощью анализа публикационного и цитатного массива на основе нейропоиска близких по тематике публикаций РИНЦ, а также наукометрических показателей сформируем ведущие исследовательские кластеры. В подборке публикаций глубиной пять лет[10] выделены активно цитируемые статьи отечественных водохозяйственных изданий. С помощью нейропоиска РИНЦ обнаружены схожие по тематике публикации, которые также подвержены фильтрации по объему цитирований. В результате получен список тематических кластеров (табл. 1), сформированных как результат анализа поиска схожих по тематикам работ до и после нейропоиска.

Дополним нейросетевой инструментарий выявления исследовательских фронтов библиоландшафтным по той же подборке исследований из журналов ВАК. Несмотря на вышеупомянутые ограничения, для выявления и систематизации тематических направлений в российских научных исследованиях, в т. ч. в области водного хозяйства, а также для оценки их актуальности возможно применение программного обеспечения VOSviewer, позволяющего

[8] Research Front 2024. Clarivate Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences. The National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Clarivate Analytic. Режим доступа: https://discover.clarivate.com/Research_Fronts_2024_EN.
[9] Research Front 2023. Clarivate Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences. The National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Clarivate Analytic. Режим доступа: https://discover.clarivate.com/Research_Fronts_2023_EN.
[10] Временной промежуток в пять лет выбран не случайно: именно за такой период, как правило, набирается количество цитирований, которое может дать объективную картину.

Таблица 1. Высокоцитируемые водохозяйственные тематики, выделенные по результатам анализа ведущих российских периодических изданий Перечня ВАК за период 2019–2023 гг.
Table 1. The often-cited water subject matters selected according the outcomes of analysis of leading Russian periodical publications of the HAT list over the 2019–2023 period

Тематика	Периодическое издание
Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата	«Водные ресурсы»
Исследование содержания частиц микропластика, их химического состава в воде и грунтах	«Водные ресурсы»
Оценка содержания пластиковых частиц в поверхностных водах оз. Байкал	«Водные ресурсы»
Управление в сфере мелиорации земель, возможности внедрения цифровых технологий	«Природообустройство»
Законодательные аспекты использования и охраны водных ресурсов	«Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление»
Влияние изменения климата на гидрологический режим водных объектов	«Метеорология и гидрология»
Проблемы и перспективы развития гидроэнергетики в России	«Гидротехническое строительство»
Методы повышения эффективности орошения в засушливых регионах	«Мелиорация и водное хозяйство»
Ухудшение условий земледелия в Нечерноземье России из-за климатических рисков и деградации мелиоративных систем	«Мелиорация и водное хозяйство»
Применение ГИС-технологий в гидрологических исследованиях	«География и природные ресурсы»
Инновационные технологии очистки сточных вод	«Водоснабжение и санитарная техника»

осуществлять кластеризацию ключевых слов, а также вычислять основные индикаторы научной активности, включая частоту упоминания терминов и их средний год опубликования.

Данные, необходимые для библиоландшафтного анализа с применением VOSviewer, могут быть получены двумя основными способами [20]. Первый предполагает выгрузку русскоязычных публикаций из сторонних баз данных, агрегирующих научные статьи по DOI и другим идентификаторам. Второй метод заключается в сборе и последующем преобразовании данных, предоставляемых БД eLibrary.ru, в формат, совместимый с зарубежным программным обеспечением, как это реализовано в рамках настоящего исследования.

Такой подход, несмотря на определенные технические ограничения, позволяет адаптировать российские научные данные для дальнейшего анализа с использованием зарубежных библиометрических инструментов.

В целях расширения представленных выше результатов авторским коллективом проведен дополнительный анализ публикаций по водохозяйственной тематике, опубликованных в российских научных журналах перечня ВАК за период с 2019 по 2023 год. В рамках исследования с использованием VOSviewer получена информация о терминологическом составе публикаций, проведена кластеризация выявленных понятий, что позволило выделить основные исследовательские направления.

Для структурирования полученных кластеров и более детального понимания взаимосвязей между ними использовался эмпирический анализ с помощью искусственного интеллекта, позволяющий группировать входящие в один кластер термины в логически связанные тематики и подтематики. В перспективе данный подход может быть усовершенствован посредством применения методов искусственного интеллекта и нейросетевого моделирования, что позволит автоматизировать процесс выявления научных трендов, а также уточнить границы тематических направлений.

На основании собранной выборки и проведенного анализа представлен перечень кластеров и входящих в них тематических направлений, отражающих структуру актуальных научных исследований в области водного хозяйства (рисунок):

– кластер 1 «Гидрология и экология водных объектов» (гидрологические, биологические и химические процессы, экологические аспекты, климатические факторы, моделирование и прогнозирование);

– кластер 2 «Гидротехнические сооружения и инженерные конструкции» (конструкционные и энергетические аспекты, эксплуатационные характеристики, гидродинамические процессы, ирригационные системы, моделирование и расчеты);

– кластер 3 «Мелиорация и управление водными ресурсами в сельском хозяйстве» (ирригация и дренаж, почвенно-водные процессы, агроэкологические аспекты, информационные технологии в мелиорации);

– кластер 4 «Развитие водохозяйственного комплекса и охрана водных ресурсов» (исторические и теоретические основы, водоснабжение и водоотведение, экологическая безопасность);

– кластер 5 «Водоотведение, очистка сточных вод и рациональное водопользование» (очистка сточных вод, рациональное использования водных ресурсов, оптимизация процессов);

– кластер 6 «Экологическое состояние водных ресурсов и управление ими» (экологическая оценка водоемов, менеджмент водных ресурсов, глобальные изменения и их последствия);

– кластер 7 «Гидроэнергетика, городская гидротехника и инфраструктура» (гидроэнергетические установки, городская гидротехника, природоохранные меры);

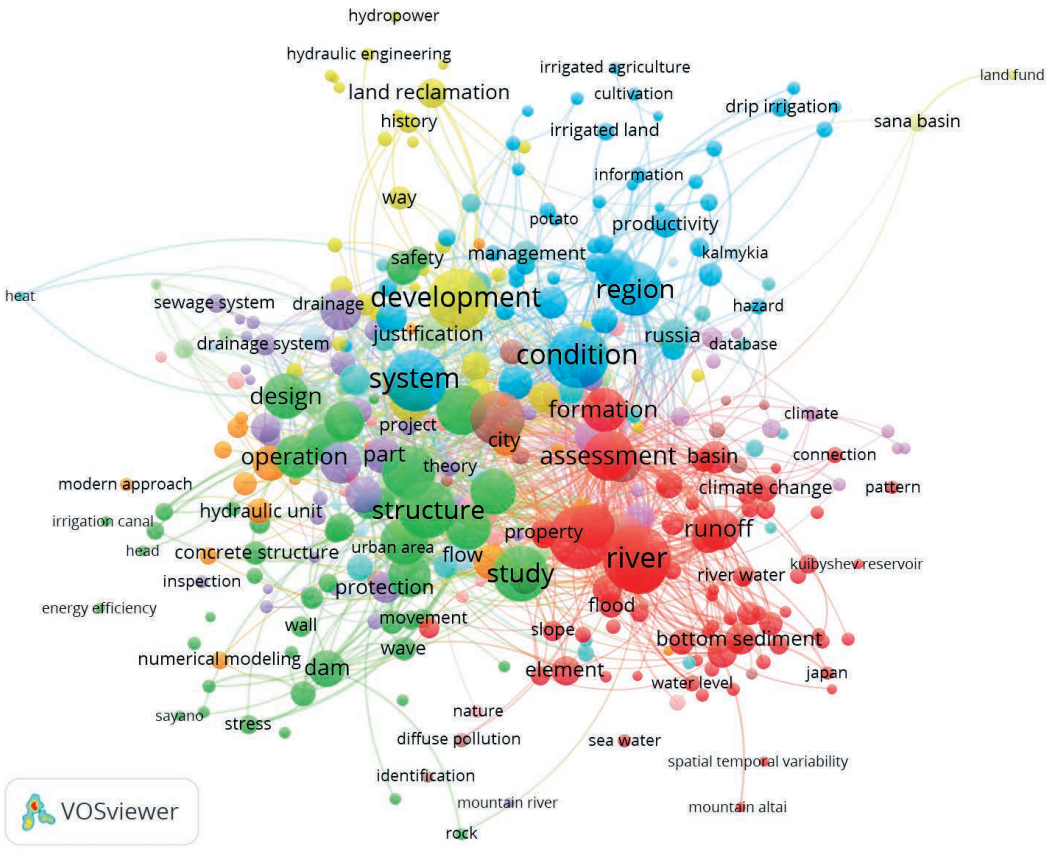


Рисунок. Карта сети терминов выборки публикаций по водохозяйственному направлению, опубликованных в российских научных журналах, входящих в перечень ВАК, за период с 2019 по 2023 год с цветовой покластерной градацией.
Figure. A map of the term sampling from publications concerning water/economic sector taken from Russian scientific journals included into the HAC list over the 2019–2023 period from with color cluster gradation.

– кластер 8 «Технологии водопользования и загрязнения» (технологии управления водными ресурсами, промышленные загрязнения, безопасность водопользования, качество воды в аграрном секторе);

– кластер 9 «Гидрологическое моделирование и изменение климата» (моделирование гидрологических процессов, климатические изменения);

– кластер 10 «Гидродинамика, расчеты водопользования и стандарты»;

– кластер 11 «Очистка сточных вод и утилизация осадков»;

– кластер 12 «Гидравлические характеристики потока»;

– кластер 13 «Земельные ресурсы и сельскохозяйственное водопользование».

Исследования в области водного хозяйства неизбежно включают территориальный аспект, поскольку природные и антропогенные факторы, влияющие

на водные ресурсы, тесно связаны с географическими условиями. Несмотря на то, что в ходе кластеризации территориальные термины распределены по разным тематическим группам, их связь с различными аспектами водопользования, гидрологии, экологии, мелиорации и гидротехническими сооружениями делает их многокластерными по сути.

Анализ частоты упоминаний ключевых территорий в публикациях позволяет выделить регионы, активно исследуемые в водохозяйственной науке, и соотнести их с тематическими направлениями: Россия – 6-й кластер; Крым – 1, 4-й кластеры; Москва и Московская область – 3, 6-й кластеры; Беларусь – 3-й кластер; Озеро Байкал – 1-й кластер; Якутия, зона вечной мерзлоты – 9-й кластер; Урал и бассейн р. Урал – 6, 8-й кластеры; Самара, Санкт-Петербург – 4-й кластер; Северные регионы, Нижняя Волга – 6-й кластер; Кавказ, Алтай, Хабаровск – 1-й кластер; Каспийское, Черное, Японское моря – 1-й кластер; Калмыкия – 12-й кластер; Башкортостан – 3-й кластер; Новосибирск, Сибирь – 5-й кластер; Приморский край, Узбекистан – 7-й кластер.

Выявленные тематики отличаются по «среднему году упоминания», что указывает на неоднородность динамики их появления в актуальных научных публикациях. Повышенные значения данного индикатора могут свидетельствовать, во-первых, о том, что определенная тематика начала активно разрабатываться лишь недавно и в предшествующие годы соответствующих публикаций либо практически не наблюдалось, либо они появлялись в незначительном количестве. Во-вторых, возможен сценарий, когда соответствующие исследования проводились на протяжении всего анализируемого периода, однако существенный всплеск интереса к ним произошел ближе к его окончанию, благодаря чему общий центр тяжести публикационной активности сместился на более поздний период.

В любом случае высокое среднее года упоминания может рассматриваться как индикатор возрастания значимости направления в современной научной дискуссии. С одной стороны, это свидетельствует о формировании новых направлений, к которым исследователи обращаются с особым энтузиазмом, с другой, – о концепциях, получающих дополнительное развитие и масштабирование в последние годы. Оценка подобной динамики помогает детальнее проследить процессы формирования и распространения исследовательских фронтов, а также выявить перспективные области, которые станут ключевыми в ближайшем будущем (формирующиеся исследовательские фронты).

Таким образом, среди самых «горячих» водохозяйственных тематик выделим следующие: климатические изменения и их влияние на водные системы; моделирование и цифровые технологии в водном хозяйстве; орошаемое земледелие и управление водными ресурсами в сельском хозяйстве; гидротехнические сооружения и инженерные аспекты водопользования; экологическое состояние водных объектов и воздействие антропогенных факторов; водоснабжение, очистка воды и сточных вод; региональные аспекты водопользования; гидрологические и геофизические процессы;

безопасность и устойчивость водохозяйственных систем; рациональное использование водных ресурсов.

Инструментарий выявления исследовательских фронтов

Полученные результаты, основанные на двух подходах – нейропоисковом анализе данных в РИНЦ и кластеризации терминов с использованием VOSviewer, – позволяют оценить структуру научных исследований в области водного хозяйства с разных инструментальных позиций. Оба метода фиксируют ключевые направления, такие как гидрологические процессы, качество воды и загрязнение, мелиорация и ирригационные системы, гидроэнергетика, технологии очистки сточных вод и применение цифровых решений в управлении водными ресурсами. Однако выявленные тематики различаются по характеру организации данных и глубине детализации.

Анализ через нейропоиск формирует перечень отдельных тем без строгой иерархии. Направления пересекаются, но не образуют четкой структуры, а их нахождение определяется скорее актуальностью научных исследований, чем концептуальной связанностью. Так, в список попали востребованные вопросы правового регулирования водопользования, влияние климатических рисков на аграрные системы, распространение микропластика в водных экосистемах, а также административные аспекты управления мелиоративными землями. Эти темы имеют выраженную междисциплинарную природу, однако их интеграция в формальные классификационные схемы оказывается затруднительной.

Метод кластеризации терминологии с использованием VOSviewer обеспечивает структурированность научного знания, формируя четкие взаимосвязи между понятиями. В рамках данного подхода выявляются, в отличие от первого способа, комплексные направления, отражающие инженерные и технологические аспекты водного хозяйства: гидротехнические сооружения, городская гидротехника, гидравлические и гидродинамические процессы, промышленное загрязнение и экологическая безопасность. Такой формат организации данных позволяет анализировать тематические и логические связи между направлениями исследований.

Таким образом, оба подхода демонстрируют свою ценность: первый фиксирует динамично развивающиеся проблемные зоны научных исследований, чувствительные к внешним вызовам и изменениям нормативно-правовой среды, тогда как второй позволяет выявлять устойчивые научные кластеры и структурированные исследовательские направления. Их комплексное использование, основанное на сочетании детализированного библиометрического анализа с широкой интерпретацией междисциплинарных взаимосвязей, дает возможность получить более глубокое представление о современной структуре водохозяйственной науки.

Результаты во многом определяются исходными установками исследователя, которые закладываются еще на этапе формирования выборки данных, выбора аналитических инструментов и интерпретации полученной информации. Эти три аспекта – исходные данные, методы анализа и способы интерпретации – взаимосвязаны и предопределяют границы возможных выводов.

Выбор тематической направленности и источников данных формирует общий контур исследования, ограничивая его либо дисциплинарными рамками, либо спецификой доступных публикационных массивов. Например, анализ водохозяйственной науки через российские публикации ВАК может демонстрировать иные акценты, чем исследования, основанные на международных базах данных. В свою очередь, метод анализа – будь то традиционные библиометрические подходы, тематическое картирование через VOSviewer или семантические модели – формирует структуру результатов, а также влияет на глубину их детализации.

Наиболее вариативной оказывается интерпретация данных, где современные аналитические инструменты открывают новые возможности для выявления скрытых закономерностей. В последние годы особый интерес представляют методы искусственного интеллекта и нейросетевого анализа, способные радикально трансформировать способы работы с библиометрическими данными. Если классические методы в большей степени ориентированы на статистическое выявление связей между терминами и публикациями, то нейросетевые алгоритмы могут быть использованы для автоматического объединения тематических направлений, выявления семантических и концептуальных взаимосвязей, а также прогнозирования дальнейшего развития научных трендов. При выявлении и анализе востребованных направлений возможно использование нейросетей (больших языковых моделей). В рамках поставленной задачи они могут выполнять соответствующий функционал (табл. 2).

Авторы статьи предлагают следующую последовательность действий работы с нейросетями в целях организации и поиска актуальных направлений и тематик исследований (табл. 3).

В случае если исследователь располагает выборкой публикаций по определенной тематике, будь то широкий научный контекст или узкий специализированный вопрос, применение больших языковых моделей позволяет провести комплексный анализ их содержания, выявляя ключевые тенденции и научные приоритеты.

При загрузке метаданных публикаций языковая модель может выделить тематические вопросы, их структуру, специфические аспекты и провести анализ методологических подходов. Также языковая модель может сформировать рекомендации для повышения научной значимости исследования. В зависимости от выявленных закономерностей рекомендации могут включать, например: сужение тематики до наиболее востребованных направлений (на основании выборки), чтобы работа соответствовала текущим научным приоритетам; выбор методологии, которая активнее прочих используется в высокоцитируемых публикациях, тем самым увеличивая потенциальную релевантность исследования; идентификацию междисциплинарных связей, позволяющих расширить исследование за счет интеграции подходов из смежных областей.

Таблица 2. Функции нейросетей в выявлении исследовательских фронтов
Table 2. Neural network functions in identification of research fronts

Функция	Описание
Анализ и обобщение научных публикаций	Помогают быстро анализировать и обобщать научные статьи и отчеты, извлекая ключевые идеи и результаты. Модели могут создавать аннотации и выделять основные результаты научных работ, что ускоряет процесс обзора литературы
Поддержка написания отчетов	Генерация текстов научных отчетов. Модели могут помочь формулировать гипотезы и разрабатывать исследовательские вопросы на основе существующих данных
Автоматизация сбора и анализа данных	Разработка автоматизированных систем, которые собирают и обрабатывают текстовые данные из научных публикаций
Виртуальные ассистенты для научных исследований	Языковые модели могут служить виртуальными ассистентами, отвечая на вопросы исследователей, предоставляя ссылки на релевантные исследования
Мониторинг актуальных исследований	Языковые модели могут сканировать научные базы данных и новостные источники, извлекая информацию о новых тенденциях, исследованиях и инновациях в области водного хозяйства
Поиск идей для дальнейших исследований	Использование для генерации идей и предложений для новых направлений исследований на основе существующей литературы и данных

Использование больших языковых моделей для анализа научных данных имеет важное преимущество: способность обрабатывать большие массивы информации, выявлять скрытые паттерны и находить взаимосвязи, которые могут ускользнуть от исследователя при традиционном анализе. В условиях растущего объема научных публикаций такие инструменты становятся незаменимыми для оптимизации научных исследований, повышения их видимости и стратегического планирования перспективных разработок. Необходимо уточнить, что нейросети следует использовать как дополнительный инструмент для генерации идей и первичного анализа. Все предложения и гипотезы должны быть критически оценены и проверены исследователями с использованием надежных научных источников.

Апробация использования нейросетей по поиску исследовательских фронтов водохозяйственной науки в России и в мире представлена в табл. 4.

Подводя итоги работы с моделями, выделим актуальные водохозяйственные тематики, связанные с изменением климата, управлением водохозяйственным комплексом и нормативно-методическим обеспечением функционирования отрасли:

1. **Круговая водная экономика:** вода используется повторно и рециркулируется в системах промышленности и городского хозяйства.

Таблица 3. Алгоритм работы с нейросетями
Table 3. An algorithm of operations with neural networks

Этап	Действие
Начальный обзор	Запросить нейросеть предоставить обширный список текущих трендов и проблем в водном хозяйстве
Уточнение темы	Выбрать несколько наиболее интересных тем из полученного списка и дать задание ИИ детализировать каждую из них
Анализ междисциплинарных связей	Дать задание нейросети найти связи между выбранными тематиками и другими областями науки
Поиск пробелов в исследованиях	Дать задание нейросети проанализировать текущее состояние исследований и выявить области, требующие дополнительного изучения
Формулировка гипотез	Использовать нейросеть для генерации потенциальных гипотез на основе выявленных пробелов в исследованиях
Методологические рекомендации	Запросить нейросеть предложить инновационные методы исследования для проверки сформулированных гипотез
Оценка потенциального воздействия	Использовать нейросеть для анализа потенциального влияния предложенных исследований на науку и общество
Поиск потенциальных коллабораций	Запросить нейросеть предложить смежные области науки или организации, с которыми можно сотрудничать в рамках выбранной тематики
Итеративный процесс	Повторить этот процесс, используя новую информацию для дальнейшего уточнения и развития темы исследования

2. **Усиление интереса к концепции водно-энергетико-продовольственного нексуса** (о взаимосвязи и взаимозависимости между доступностью воды, производством энергии и продуктов питания).

3. **Применение природоориентированных решений** (Nature-Based Solutions) для управления водными ресурсами. Использование естественных экосистем и процессов для улучшения качества воды, регулирования стока и защиты от наводнений.

4. **Социально-экономические аспекты водного хозяйства**: изучение управления водными ресурсами с точки зрения прав человека, доступа к воде, ценообразования и политики распределения ресурсов.

5. **Изменение климата и его влияние на водные ресурсы**: изучение воздействия изменения климата на гидрологические циклы, доступность воды и частоту экстремальных погодных явлений, таких как наводнения и засухи.

Таблица 4. Апробация использования нейросетей по поиску исследовательских фронтов водохозяйственной науки
Table 4. Appraisal of the neural networks use in the search of water science research fronts

Исследовательский фронт	Описание
Цифровизация и интеллектуальные системы управления	Интернет вещей (IoT) и «умные» системы управления водоснабжением: внедрение датчиков и систем IoT для мониторинга и управления водными ресурсами и инфраструктурой. Искусственный интеллект и машинное обучение: использование алгоритмов машинного обучения для прогнозирования качества воды, управления водными ресурсами и оптимизации использования водных систем
Водоснабжение и управление водными ресурсами	Водный дефицит и управление водными ресурсами: разработка стратегий адаптации к изменению климата и управлению водными ресурсами для обеспечения устойчивого водоснабжения. Децентрализованные системы водоснабжения и очистки: внедрение автономных систем для обеспечения чистой питьевой водой в удаленных или малонаселенных районах. Мониторинг и управление качеством воды: использование сенсорных технологий и систем управления для контроля качества воды
Технологии очистки и повторное использование сточных вод	Мембранные технологии: разработка новых типов мембран для улучшения эффективности процессов фильтрации и обеззараживания воды. Использование наноматериалов: применение нанотехнологий в процессах очистки и дезинфекции воды для повышения эффективности удаления загрязнителей. Биологическая очистка: использование биотехнологий и микробиологических методов очистки сточных вод
Адаптация к изменению климата, управление рисками наводнений	Анализ и моделирование изменений водного цикла: изучение влияния климатических изменений на речные системы и водоносные горизонты. Системы предупреждения и реагирования на наводнения: разработка технологий и моделей прогнозирования наводнений, систем управления стоками и паводками. Большое внимание уделяется моделированию и адаптации стратегий управления водными ресурсами
Водная энергетика	Гидроэнергетика малых рек: исследования по повышению эффективности и экологической безопасности малых гидроэлектростанций. Гибридные системы возобновляемой энергетики: комбинация водной энергетики с другими возобновляемыми источниками, такими как солнечная и ветровая энергии. Исследования в области преобразования сточных вод в энергию демонстрируют рост интереса к этому направлению
Международное сотрудничество и правовое регулирование	Разработка политики и стратегий управления водными ресурсами: анализ эффективности правовых и нормативных актов в области водопользования. Участие заинтересованных сторон: исследование подходов к вовлечению местных сообществ и частного сектора в управление водными ресурсами. Исследовательские фронты остаются ключевыми элементами успешного управления водными ресурсами, учитывая трансграничный характер многих водных объектов и необходимость международной координации
Экологическая реабилитация и сохранение водных экосистем	Реабилитация загрязненных водных объектов: исследование и внедрение методов восстановления экосистем рек, озер и прибрежных зон. Биоразнообразие и сохранение водных ресурсов: изучение способов сохранения и восстановления биоразнообразия в водных экосистемах

6. **Цифровизация и умное управление водными ресурсами** для оптимизации управления водными системами, повышение качества мониторинга и прогнозирования водоснабжения.

7. **Трансграничное водное сотрудничество и водная безопасность**: разработка механизмов международного сотрудничества для совместного управления реками, озерами и водоносными горизонтами.

8. **Устойчивые градостроительные практики и водная инфраструктура**: проектирование городов, включая создание зеленой и синей инфраструктуры, способствующей управлению ливневыми водами и улучшению городской среды.

9. **Водная дипломатия и политика**: анализ и разработка политик и стратегий на национальном и международном уровнях.

10. **Биоинженерные технологии в управлении водными ресурсами**: использование биотехнологий для очистки воды, восстановления водных экосистем и разработки устойчивых решений для водного хозяйства.

11. **Влияние урбанизации на водные ресурсы**: изучение влияния быстрого роста городов на водоснабжение, качество воды и экосистемы, разработка адаптационных мер.

12. **Восстановление рек и повышение качества экосистемных услуг**: реализация проектов по восстановлению естественных русел рек, улучшению их экологического состояния.

13. **Управление водоразделами**: комплексный подход к управлению территорией, включающий все составляющие водораздела, для обеспечения устойчивого использования водных и земельных ресурсов.

ВЫВОДЫ

Использование специализированного наукометрического инструментария позволяет определить актуальные тематики, отвечающие современным вызовам. Все выявленные ключевые исследовательские фронты коррелируют с задачами, поставленными в государственных документах, касающихся научно-технологического развития, направлений фундаментальных научных исследований (соответствующих «большим вызовам»), стратегии развития водохозяйственного комплекса страны. С помощью наукометрических инструментов и методов возможно проведение мониторинга актуальных исследований, что позволит аргументированно подходить к выбору тем научных изысканий, достоверно и детально анализировать узкоспециализированные тематики, оценивать возможности их развития. Наукометрические обзоры в настоящее время являются одним из наиболее эффективных инструментов выбора и установления «точек роста».

Однако принципиально важно отслеживать не только количество публикаций по направлению, но и интенсивность их роста. Сегодня возможно использовать уже полученные в ведущих мировых исследованиях результаты. В этом принципиальная важность наукометрических обзоров. Для водохозяйственного комплекса России (как и большинства других стран) в настоящее время остаются актуальными следующие первоочередные задачи:

– обеспечение устойчивости функционирования систем водоснабжения;

– минимизация негативного влияния вод, в первую очередь борьба с паводками;

– обеспечение экологической устойчивости поверхностных водных объектов в условиях возрастающего антропогенного давления и климатических изменений.

В своих последующих работах коллектив авторов планирует оценить с помощью наукометрического и эконометрического анализа новые подходы, инструментарий в решении мировой научной общественностью проблем в ключевых исследовательских фронтах. Возможен дальнейший углубленный анализ выделенных научных фронтов с детальной систематизацией существующих решений, оценкой методов и выявлением скрытых взаимосвязей через библиометрические инструменты, что позволит выйти за пределы направлений первого уровня, выявляя малоизученные аспекты. Применение наукометрического программного обеспечения и нейросетевых алгоритмов также открывает возможности для более глубокого изучения подтематик, выявления неочевидных междисциплинарных пересечений и прогнозирования развития водохозяйственной науки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

Обнаружение схожих по тематике статей и выделение общих тематических направлений.

APPLICATION OF GENERATIVE MODELS

Detection of the articles similar in subjects and identification of the common thematic directions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kosten J. A classification of the use of research indicators // Scientometrics. 2016. Vol. 108. P. 457–464.
2. Bornmann L., Haunschild R. Does evaluative scientometrics lose its main focus on scientific quality by the new orientation towards societal impact? // Scientometrics. 2016. Vol. 108. P. 465–472.
3. Благинин В.А., Матвеева А.И. Исследовательские фронты: стратегический императив развития российской науки // Московский экономический журнал. 2016. № 4. С. 54.
4. Yu D., Yan Z. Combining machine learning and main path analysis to identify research front: from the perspective of science-technology linkage // Scientometrics. 2022. P. 4251–4274. https://doi.org/10.1007/s11192-022-04443-1.
5. Lancho Barrantes B.S. Exploratory factor analysis of bibliometric indicators for the Sustainable Development Goals // Scientometrics. 2025. https://doi.org/10.1007/s11192-025-05256-8.
6. Саргсян Ш.А., Мирзоян А.Р., Благинин В.А. Поиск ведущих научных направлений Республики Армения на основе интеллектуального анализа наукометрических данных // Bi-технологии и корпоративные информационные системы в оптимизации бизнес-процессов цифровой экономики: мат-лы VI Международной научно-практической очно-заочной конференции. 2019. С. 85–90.

7. Bascur J.P., Verberne S., van Eck N.J. et al. Which topics are best represented by science maps? An analysis of clustering effectiveness for citation and text similarity networks // Scientometrics. 2025. Vol. 130. P. 1181–1199. https://doi.org/10.1007/s11192-024-05218-6.
8. Fujita K., Kajikawa Y., Mori J., Sakata I., Detecting research fronts using different types of weighted citation networks // Journal of Engineering and Technology Management. 2014. Vol. 32. P. 129–146.
9. Bornmann L., Marx W. HistCite analysis of papers constituting the h index research front // Journal of Informetrics. 2012. Vol. 6. Iss. 2. P. 285–288.
10. Боргоякова К.С., Бычкова Е.Ф., Земсков А.И., Кондрашева И.Ю. Библиометрический анализ научных публикаций по экологии на основе реферативной базы данных «Экология: наука и технологии» ГПНТБ России // Научные и технические библиотеки. 2017. № 10. С. 54–68. EDN: ZKAOAP.
11. Suriya Prabhaa S., Bindu N., Manoj P., Satheesh Kumar K. Citation network analysis of plastic electronics: Tracing the evolution and emerging research fronts: Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. Part 2. P. 1345–1350.
12. Bascur J.P., Verberne S., van Eck N.J. et al. Which topics are best represented by science maps? An analysis of clustering effectiveness for citation and text similarity networks // Scientometrics. 2025. Vol. 130. P. 1181–1199. https://doi.org/10.1007/s11192-024-05218-6.
13. Благинин В.А., Гончарова М.Н., Соколова Е.В. «Вырваться с национального уровня»: наукометрический вектор развития российских журналов в МНБД // Управленец. 2023. Т. 14. № 4. С. 33–57. DOI: 10.29141/2218-5003-2023-14-4-3. EDN: JTINUG.
14. Литвиненко Т.В. Научные публикации в области экономики сельского хозяйства: наукометрический анализ тематики // Библиосфера. 2024. № 1. С. 93–106. DOI 10.20913/1815-3186-2024-1-93-106. EDN: RBCIAM
15. Бастракова М.С. Становление советской системы организации науки (1917–1922). М.: Наука. 1973. 294 с.
16. Наука большой страны: советский опыт управления / под ред. Е.А. Долговой. М.: РГГУ, 2023. 625 с.
17. Валек Н.А. Роль и место отраслевой науки в системе научной деятельности // Вопросы истории естествознания и техники. 2025. Т. 46. № 2. С. 311–341.
18. Валек Н.А. Российская водохозяйственная наука в базах научного цитирования. Екатеринбург, 2021. 80 с.
19. Sargsyan S., Gzoyan E., Mirzoyan A., Blaginin V. Scientometric Implosion that Leads to Explosion: Case Study of Armenian Journals // Journal of Data and Information Science. 2020. Vol. 5. No. 3. P. 187–196. DOI: 10.2478/jdis-2020-0028. EDN: PRJAOA.
20. Perianes-Rodriguez A., Waltman L. & Van Eck N.J. Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting // Journal of Informetrics. 2016. 10 (4). P. 1178–1195.

REFERENCES

1. Kosten J. A classification of the use of research indicators. *Scientometrics*. 2016. Vol. 108. P. 457–464.
2. Bornmann L., Haunschild R. Does evaluative scientometrics lose its main focus on scientific quality by the new orientation towards societal impact? *Scientometrics*. 2016. Vol. 108. P. 465–472.
3. Blaginin V.A., Matveyeva A.I. Research fronts: a strategic imperative of the Russian science development. *Moscow economic journal*. 2016. No. 4. P. 54.
4. Yu D., Yan Z. Combining machine learning and main path analysis to identify research front: from the perspective of science-technology linkage. *Scientometrics*. 2022. P. 4251–4274. https://doi.org/10.1007/s11192-022-04443-1.
5. Lancho Barrantes B.S. Exploratory factor analysis of bibliometric indicators for the Sustainable Development Goals. *Scientometrics*. 2025. https://doi.org/10.1007/s11192-025-05256-8.
6. Sargsyan S.A., Mirzoyan A.R., Blaginin V.A. Retrieval of leasing scientific directions of the republic of Armenia based on scientometric data intellectual analysis. Bi-techniques and corporative information systems in optimization of the digital economy business-processes: proceedings of VI International scientific/practical conference. 2019. P. 85–90.

7. Bascur J.P., Verberne S., van Eck N.J. et al. Which topics are best represented by science maps? An analysis of clustering effectiveness for citation and text similarity networks. *Scientometrics.* 2025. Vol. 130. P. 1181–1199. https://doi.org/10.1007/s11192-024-05218-6.
8. Fujita K., Kajikawa Y., J. Mori, Sakata I. Detecting research fronts using different types of weighted citation networks. *Journal of Engineering and Technology Management*. 2014. Vol. 32. P. 129–146.
9. Bornmann L., Marx W. HistCite analysis of papers constituting the h index research front. *Journal of Informetrics*. 2012. Vol. 6. Iss. 2. P. 285–288.
10. Borgoyakova K.S., Bychkova E.F., Zemskov A.I., Kondrasheva I.Y. Bibliometric analysis of scientific publications on ecology based on the "Ecology: Science and technology" reference database of Russian GPNTB. *Scientific and technological libraries*. 2017. No. 10. P. 54–68. EDN: ZKAOAP.
11. Suriya Prabhaa S., Bindu N., Manoj P., Satheesh Kumar K. Citation network analysis of plastic electronics: Tracing the evolution and emerging research fronts. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 33. Part 2. P. 1345–1350.
12. Bascur J.P., Verberne S., van Eck N.J. et al. Which topics are best represented by science maps? An analysis of clustering effectiveness for citation and text similarity networks. *Scientometrics*. 2025. Vol. 130. P. 1181–1199. https://doi.org/10.1007/s11192-024-05218-6.
13. Blaginin V.A., Goncharova M.N., Sokolova E. V. «To break out from the national level»: scientometric vector of the Russia journals development. *Manager*. 2023. Vol. 14. No. 4. C. 33–57. (In Russ.). DOI 10.29141/2218-5003-2023-14-4-3. EDN: JTINUG.
14. Litvinenko T.V. Scientific publications in the sphere of agricultural economy: scientometric analysis of the subject matter. *Bibliosfera*. 2024. No. 1. P. 93–106. DOI 10.20913/1815-3186-2024-1-93-106. EDN: RBCIAM.
15. Bastrakova M.S. Formation of the Soviet system of science organization (1917–1922). M.: Nauka. 1973. 294 p. (In Russ.).
16. Science of the great country: Soviet experience in management. Edited by E.A. Dolgova. M.: RGGU, 2023. 625 p. (In Russ.).
17. Valek N.A. The role and position of the trade science within the system of scientific activities. *Issues of the natural science and technology*. 2025. Vol. 46. No. 2. P. 311–341.
18. Valek N.A. Russian water science in the bases of scientific citation. Ekaterinburg, 2021. 80 p. (In Russ.).
19. Sargsyan S., Gzoyan E., Mirzoyan A., Blaginin V. Scientometric Implosion that Leads to Explosion: Case Study of Armenian Journals. *Journal of Data and Information Science*. 2020. Vol. 5. No. 3. P. 187–196. DOI: 10.2478/jdis-2020-0028. EDN: PRJAOA.
20. Perianes-Rodriguez A., Waltman L. & Van Eck N.J. Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting. *Journal of Informetrics*. 2016. Vol. 10 (4). P. 1178–1195.

Сведения об авторах:

Валек Наталья Анатольевна, канд. филол. наук, заведующая отделом научно-технической информации, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Уральский филиал, Россия, 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; ORCID: 0000-0003-2008-2579; e-mail: natfil22@mail.ru

Благинин Виктор Андреевич, канд. экон. наук, начальник управления наукометрии, научно-исследовательской работы и рейтингов, заведующий научно-исследовательской лабораторией наукометрического анализа и библиоландшафтных исследований, ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45; ORCID: 0000-0001-5117-4148; e-mail: v.a.blaginin@usue.ru

Соколова Елизавета Витальевна, специалист отдела наукометрии, ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45; ORCID: 0000-0002-4336-5283; e-mail: sokolova_ev@usue.ru

About the authors:

Natalia A. Valek, Candidate of Philological Sciences, Head, Department of Scientific/engineering Information, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Ural Branch, ul. Mira, 23, Ekaterinburg, 620078, Russia; ORCID: 0000-0003-2008-2579; e-mail: natfil22@mail.ru

Viktor A. Blaginin, Candidate of Economic Sciences, Head, Department of scientometric, researchers and ratings; Head, Research laboratory of scientometric analysis and bibliolandscape researches, Ural State Economic University, ul. 8 Marta/Narodnoy Voli, 62/45, Ekaterinburg, 620144, Russia; ORCID: 0000-0001-5117-4148; e-mail: v.a.blaginin@usue.ru

Elizaveta V. Sokolova, Expert, Scientometric Department, Ural State Economic University, ul. 8 Marta/Narodnoy Voli, 62/45, Ekaterinburg, 620144, Russia; ORCID: 0000-0002-4336-5283; e-mail: sokolova_ev@usue.ru

Поступила в редакцию / Received 14.03.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 1.04.2025.
Принята к публикации / Accepted 22.04.2025.

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 19.06.2025. Дата выхода в свет 06.07.2025.
Формат 70x100 $^{1}/_{16}$. Усл. печ. л. 7,25. 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

