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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

научно-практический журнал

№ 1, 2026

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

scietific | practical journal

No. 1, 2026

РОСВОДРЕСУРСЫ
ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ВЫПОЛНЯЕТСЯ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО (МУНИЦИПАЛЬНОГО) ЗАДАНИЯ

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

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

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

scientific/practical journal

№ 1, 2026

Журнал входит в список ВАК,
Белый список научных журналов, RSCI, ядро РИНЦ

РОСВОДРЕСУРСЫ
THE PUBLICATION OF THE JOURNAL
IS CARRIED OUT WITHIN THE FRAMEWORK
OF THE STATE (MUNICIPAL) ASSIGNMENT

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

К оценке расчетных значений максимального стока
в нижних бьефах гидроузлов
М. В. Болгов 5

Проведение прогнозного моделирования поступления загрязненных
грунтовых вод в реку Вятку в рамках трехмерного подхода
Т. П. Любимова, Я. Н. Паршакова 16

Водохозяйственный баланс водохранилища «Светлогорское»
А. А. Волчек, С. И. Парфомук, С. В. Сидак, Н. Н. Шешко, Н. Н. Шпендик 31

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Оценка влияния снижения объемов сброса загрязненных сточных вод
на качество воды речных бассейнов России
С. Д. Беляев, А. Е. Косолапов, Е. А. Поздина 57

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Эмиссия метана в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища:
исследование методом плавучих камер
*О. В. Никитин, Н. Ю. Степанова, Л. В. Новикова, А. С. Гордеев,
Р. С. Кузьмин, В. З. Латыпова* 76

Гидрохимический режим Волгоградского водохранилища
в подледные периоды 2011–2024 годов
Е. А. Шашуловская, С. А. Мосияш 94

Мониторинг уровня воды озера Сарыкамыш на основе данных
дистанционного зондирования Земли
С. Б. Калабаев 109

CONTENT

WATER/ECONOMIC SECTOR MANAGEMENT

Assessing the design maximum discharges values
in the lower pool of hydroelectric power plants
M. V. Bolgov.....5

Conducting predictive modeling of contaminated groundwater inflow
into the Vyatka River using a three-dimensional approach
T. P. Lyubimova, Y. N. Parshakova.....16

Water management balance of the Svetlogorskoye reservoir
A. A. Volchek, S. I. Parfomuk, S. V. Sidak, N. N. Sheshko, N. N. Shpendik.....31

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

Assessment of the decreasing of polluted waste waters discharge
on the Russian river basins' water quality
S. D. Belayev, A. Y. Kosolapov, E. A. Pozdina.....57

WATER RESOURCES STUDIES

Methane emissions from the shallow water zone of the Kuibyshev reservoir:
a floating chamber study
O. V. Nikitin, N. Y. Stepanova, L. V. Novikova, A. S. Gordeev, R. S. Kuzmin,
V. Z. Latypova.....74

Hydrochemical conditions of the Volgograd reservoir
during the ice-covered periods of 2011–2024
E. A. Shashulovskaya , S. A. Mosiyash.....97

Monitoring of water level of Lake Sarygamysh based on Earth remote sensing data
S. B. Kalabaev.....109

УДК 556.048 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-5-15*

Оригинальная статья/Original paper

К оценке расчетных значений максимального стока в нижних бьефах гидроузлов

М. В. Болгов

bolgovmv@mail.ru

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия
Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Одной из важных задач инженерной гидрологии, решение которой не в полной мере регламентировано действующими нормативно-методическими документами, является определение расчетных максимальных расходов воды в нижних бьефах гидроузлов при регулировании стока. Такого рода характеристики обычно рассчитываются при разработке Правил использования водных ресурсов и приобретают легитимный характер на период действия этого документа. В связи с тем, что на большинстве водохозяйственных объектов срок действия существующих Правил давно истек, а гидрологоклиматические характеристики и требования к отдаче водохозяйственных систем заметно изменились, возникает необходимость совершенствования методов водохозяйственного и гидрологического расчета, актуализации существующих оценок. Произошедшее в 2024 г. наводнение на р. Урал в районе городов Орска и Оренбурга выявило ряд проблем, касающихся как общего состояния дел в области инженерной защиты городов, так и нормативной практики инженерной гидрологии. **Методы.** Одной из основных проблем инженерной гидрологии является оценка экстремальных величин стока в условиях хозяйственной деятельности. В этих случаях стандартные методы статистической обработки рядов наблюденных значений гидрологических характеристик становятся неэффективными и необходимо развивать подходы, основанные на комбинации представлений о естественной изменчивости стока и об изменении гидрологических параметров в процессе эксплуатации водохозяйственной установки. **Результаты.** На примере Ириклинского гидроузла на р. Урал предложены подходы к определению характеристик максимального стока в нижнем бьефе, учитывающие особенности регулирования стока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: максимальный сток, функция распределения вероятностей, регулирование, предполоводная сработка, нижний бьеф, затопление, расчетный расход воды

Финансирование: Исследование выполнено в рамках темы № FMWZ-2025-0001 государственного задания Института водных проблем РАН.

Для цитирования: Болгов М. В. К оценке расчетных значений максимального стока в нижних бьефах гидроузлов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 5–15. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-5-15; EDN: QRJIYQ

© Болгов М. В., 2026

Assessing the design maximum discharges values in the lower pool of hydroelectric power plants

Mikhail V. Bolgov

bolgovmv@mail.ru

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Russian Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don, Russia

ABSTRACT

Relevance. One of the important tasks of engineering hydrology and river runoff regulation, the solution of which is not fully regulated by current regulatory and methodological documents, is the determination of the design maximum discharges in the lower pools of hydraulic structures during flow regulation. These characteristics are calculated during the development of Water Resources Use Regulations and are valid for the duration of this document's validity. **Methods.** However, since the validity of the existing Regulations has long since expired for most water management facilities, the hydrological and climatic characteristics and performance requirements of water management systems have changed significantly, necessitating the improvement of water management and hydrological calculation methods and updating existing assessments. **Results.** The 2024 flood on the Ural River near the cities of Orsk and Orenburg revealed a number of issues related to both the general state of urban engineering protection and regulatory practices in engineering hydrology. One of the key challenges is assessing extreme runoff values under economic conditions. Using the Iriklinsky Hydroelectric Complex on the Ural River as an example, approaches to determining the characteristics of maximum runoff in the downstream basin are discussed.

KEYWORDS: maximum flow, probability distribution function, regulation, pre-flood drawdown, tailwater, flooding, design water flow

Financing: The study was carried out within the framework of topic No. FMWZ-2025-0001 of the state assignment of the Institute of Problems of Problems of the Russian Academy of Sciences

For citation: Bolgov M. V. Assessing the design maximum discharges values in the lower pool of hydroelectric power plants. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 1. P. 5–15. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-5-15; EDN: QRJIYQ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из недостаточно изученных задач в инженерной гидрологии является определение расчетных значений максимальных расходов воды (величин заданной вероятности превышения) в нижних бьефах гидроузлов. Параметры и режим речного стока в целом под действием регулирования существенно изменяются по сравнению с естественным режимом, и в значительной мере это относится к таким гидрологическим характеристикам, как максимальный расход воды и объем стока половодья или паводка.

Первая проблема заключается в том, что водохозяйственные (водно-энергетические) расчеты, как правило, выполняются по интервалам, величины которых изменяются от декады до месяца, в то время как для определения расчетных расходов и уровней воды в строительном проектировании при расче-

те нагрузок и зон затопления используются в основном среднесуточные или мгновенные (срочные) максимальные величины стока.

Вторая проблема возникает по причине неопределенности, связанной с вероятностным характером начальных условий при выполнении расчетов трансформации гидрографа притока (паводка или половодья) в процессе регулирования стока. По причине климатической изменчивости стока и в силу различного рода ошибок гидрологического прогноза при управлении водохранилищем на момент начала паводка формируется запас воды, определяемый правилами предполоводной сработки, который описывается законом распределения вероятностей. Этот закон определяется не только «стохастичностью» притока, но и принятыми правилами управления водными ресурсами. Получить оценку этого распределения можно на основе результатов водохозяйственных расчетов.

Во многих случаях инженерно-гидрологических расчетов, выполняемых при обосновании защитных мероприятий в нижних бьефах гидротехнических сооружений, эксплуатация которых насчитывает не одно десятилетие, возникает задача оценки расходов и уровней воды, требующая, с одной стороны, учета естественной изменчивости притока, а с другой – согласования с проектными характеристиками регулирующих сооружений, в частности сбросных расходов. В статье рассматривается подход, позволяющий формализовать решение этой задачи.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате водохозяйственных расчетов может быть получено распределение вероятностей среднедекадных или среднемесячных наполнений и сбросных расходов. Для получения этих распределений вероятностей в теории регулирования стока существуют как аналитические методы, так и имитационные подходы [1–3]. Теоретически это наиболее правильный путь, но очевидна необходимость введения корректировки для учета разницы между среднеинтервальным и максимальным значениями сбросного гидрографа, что является достаточно сложной задачей, поскольку сброс в нижний бьеф может осуществляться в любую фазу гидрографа притока и при различных наполнениях регулирующей емкости.

В большинстве практических случаев водохозяйственного расчета задача определения максимальных расходов и уровней в нижнем бьефе решается путем пропуска расчетного паводка или половодья различной обеспеченности (имеется в виду гидрограф притока к водохранилищу) в совокупности с определением уровней форсировки водохранилища. Методика построения расчетного гидрографа общеизвестна[1] [4–6], хотя и несовершенна. С учетом особенностей работы водосбросных устройств (водосбросов, отводных каналов,

1 Руководство по гидрологической практике. Том II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. 6-е издание, 2012. ВМО № 168.

водоводов, шлюзов) и прочих условий и ограничений, на основе расчетного гидрографа притока к водохранилищу половодья или паводка заданной обеспеченности рассчитывается максимальный сбросной расход в нижний бьеф, которому приписывается та же обеспеченность. Основной сложностью или неопределенностью при реализации такого подхода является задание параметра наполнения водохранилища на момент начала пропуска половодья.

Правилами использования водных ресурсов водохранилищ[2] предусматривается предполоводная сработка, обеспечивающая и безопасность гидроузла, и более эффективное использование водных ресурсов. В зависимости от складывающейся водохозяйственной обстановки (водности) за предшествующий паводку период и при наличии или отсутствии гидрологического прогноза допускаются различные уровни предполоводной сработки. Это обстоятельство означает, что расчетное половодье может пропускаться при разных уровнях наполнения водохранилища (при различной свободной емкости), и эти наполнения необходимо далее рассматривать как случайные величины с известными распределениями вероятностей.

В результате расчетов пропуска половодья получается сбросной гидрограф, которому, как уже отмечалось выше, приписывается та же обеспеченность, что и у гидрографа притока. В некоторых случаях это допустимо, например для весьма редких событий и при небольшом объеме водохранилища. При выполнении таких расчетов существенное значение имеет форма гидрографа притока, принимаемого в качестве модели: из нескольких наблюденных высоких половодий выбирают модель, наихудшую по результатам, например ту, которая при заданной емкости форсировки приводит к наибольшему расходу в нижнем бьефе, и этому расходу декларативно приписывается та же (заданная) расчетная обеспеченность.

При паводках большей повторяемости, при многолетнем регулировании стока такая упрощенная схема уже не срабатывает: паводочный сток может полностью аккумулироваться в водохранилище, и в нижний бьеф в этом случае будет сбрасываться искусственный санитарный (или экологический) гидрограф. Так что применение этого подхода к построению всей кривой обеспеченности сбросов в нижний бьеф встречает ряд сложностей. Закон распределения сбросных расходов не описывается стандартными функциями распределения вероятностей. В качестве примера на рис. 1 приведена кривая обеспеченности сбросного расхода воды в нижний бьеф Цимлянского гидроузла, полученная методом стохастического динамического программирования [3].

Рассмотрим далее возможные подходы к решению проблемы оценки максимального стока в нижнем бьефе на примере Ириклинского гидроузла на р. Урал.

2 СП 529.1325800.2023. Свод правил. Определение основных расчетных гидрологических характеристик (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 11.09.2023 № 654/пр.).

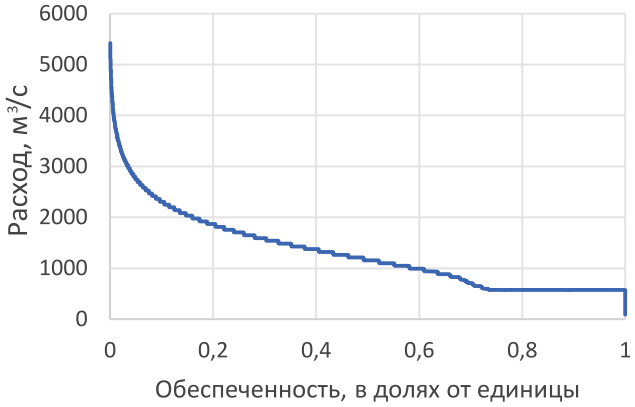


Рис. 1. Функция распределения сбросного расхода за третью декаду мая в нижний бьеф Цимлянского гидроузла
Fig. 1. Distribution function of the discharge over the third ten-day period of May in to the downstream reach of the Tsimlyansk hydro plant

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первую рабочую гипотезу сформулируем следующим образом: расчетное значение стока (максимальный расход воды в нижнем бьефе вероятностью превышения 1 %) может быть получено как математическое ожидание максимальных значений сбросного расхода этой обеспеченности при различных уровнях предполоводной сработки. Для вычисления математического ожидания необходимо располагать результатами пропуска расчетного половодья заданной обеспеченности и распределением вероятностей наполнений водохранилища, предшествующих началу половодья (паводка).

Рассмотрим расчет максимального расхода воды в нижнем бьефе Ириклинского гидроузла, осуществляющего многолетнее регулирование стока, на примере определения расхода 1 %-й обеспеченности. Результаты пропуска паводка в этом случае существенно зависят от уровня предполоводной сработки.

В проекте ПИВР Верхне-Уральского, Магнитогорского и Ириклинского водохранилищ 2012 г.[3] приведены результаты расчета пропуска гидрографа 1 %-й обеспеченности через гидроузел для двух случаев – с прогнозом и без прогноза. Рассмотрим далее вариант без прогноза. Результаты расчетов для шести вариантов предполоводной сработки из упомянутого проекта представлены в табл. 1. Там же указаны объемы Ириклинского водохранилища, соответствующие уровням предполоводной сработки (колонка 4). В колонке 5 приведено число лет, в которые каждый интервал уровней (или объем) предполоводной сработки был достигнут. В качестве такового взят объем воды на начало водохозяйственного года, полученный в результате водохозяйственного расчета (табл. 4.14 из проекта ПИВР, стр. 132). В колонке 5 приведено число лет, когда

3 Правила использования водных ресурсов Верхне-Уральского, Магнитогорского и Ириклинского водохранилищ. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2013. 460 с. (Проект).

Таблица 1. Расчет максимального расхода обеспеченностью 1 % при заданных диспетчерских правилах (без учета прогноза, на основе Проекта ПИВР 2012 г.)
Table 1. Calculation of 1 % probability maximal flow in case of pre-set dispatch data (without taking in account the forecast, on the basis of the designed Rules of water resources use 2012

№	Диапазон уровней предполоводной сработки, Н, м	Расход Q в нижнем бьефе при пропуске 1 % гидрографа, м³/с при заданной сработке	Объем воды в вдхр, км³	Вероятность P (число лет / в долях от 1,0) наполнения вдхр в начале в/х года в диапазоне	P × Q, м³с
1	245,0	5700	3,25	0 / 0	0,0
2	243,1–245,0	4900	2,77	56 / 0,737	3611
3	241,0–243,1	4400	2,32	13 / 0,171	752
4	239,0–241,0	4000	1,92	2 / 0,027	108
5	237,0–239,0	3500	1,57	4 / 0,053	185
6	235,0–237,0	3100	1,28	1 / 0,014	44
				Сумма, Q 1 % =	**4689**

объем воды попадал в диапазон, соответствующий заданному уровню сработки, и рассчитана соответствующая вероятность в долях от единицы исходя из общего числа расчетных лет – 76.

В качестве расчетного значения максимального расхода $Q_{1\%}$ предлагается рассматривать его математическое ожидание при различных величинах сработки (сумма произведений расходов на их вероятности). В этом случае для Ириклинского гидроузла предлагается максимальный сбросной расход в нижний бьеф 1 %-й обеспеченности принять равным 4689 м³/с.

Для иллюстрации использованных данных на рис. 2 приведены значения наполнения водохранилища по годам водохозяйственного расчета. Для бассейна Урала характерны длительные маловодные периоды, поэтому периоды низкого наполнения соответствуют периодам низкого притока (рис. 2).

Вторая рабочая гипотеза относительно методики расчета максимального расхода заданной обеспеченности заключается в следующем. По-прежнему рассматривается задача получения распределения вероятностей максимально-

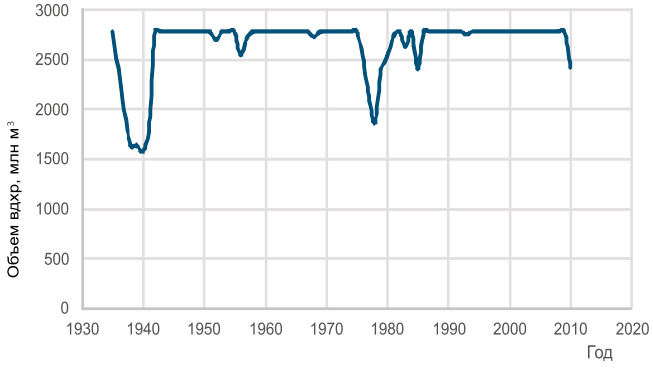


Рис. 2. Наполнение Ириклинского водохранилища на начало водохозяйственного года по данным водохозяйственного расчета ПИВР
Fig. 2. Filling of the Iriklinsk Reservoir by the beginning of water/economic year according the data of the PIVR water/economic calculations

го расхода воды в нижнем бьефе. Вероятность превышения (обеспеченность) максимального расхода воды в нижнем бьефе рассчитана исходя из предположения о том, что этот расход превышен в результате пропуска паводков разной обеспеченности и при различных наполнениях водохранилища на момент начала расчета.

Подходы к решению такого рода вероятностных задач могут основываться на различных принципах [8–10]. Далее рассмотрим построение расчетной кривой обеспеченности на основе байесовского подхода, который состоит в вычислении прогнозной плотности по формуле полной вероятности. В этом случае плотность распределения вероятностей максимального расхода воды $\varphi(x)$ вычисляется как интеграл от произведения плотности распределения максимального расхода в нижнем бьефе $f(x,\theta)$, умноженной на вероятность предполоводной сработки:

$$\varphi(x) = \int_{\theta} f(x,\theta) \cdot \alpha(\theta) d\theta. \quad (1)$$

Если интеграл в (1) заменить суммой по всем рассмотренным вариантам предполоводной сработки и перейти от плотностей распределения вероятностей к обеспеченностям, то получим ординаты кривой обеспеченности максимального расхода в нижнем бьефе $P(x)$, учитывающей различные вероятности предполоводной сработки водохранилища в следующем виде:

$$P(x) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \, P_i \, (x) \, , \quad (2)$$

где α_i – вероятность i-того значения предполоводной сработки;

$P_i(x)$ – обеспеченность максимального сбросного расхода x при принятой i-той величине предполоводной сработки;

N – число вариантов (диапазонов) расчета предполоводной сработки.

Расчет обеспеченности заданного расхода воды осуществляется с учетом вероятности превышения разных наполнений следующим образом:

1. Для каждого предпаводочного наполнения водохранилища рассчитывается кривая обеспеченности максимальных расходов воды стандартным способом (пропуска расчетного гидрографа различных обеспеченностей). На рис. 3 для Ириклинского гидроузла приведены результаты расчета для шести вариантов из ПИВР 2012 г.

2. Задается набор значений расходов воды в нижний бьеф и по байесовской формуле (2) рассчитывается его вероятность (обеспеченность) графическим путем: с помощью семейства кривых (рис. 3) для заданного расхода снимаются показатели обеспеченности с кривых обеспеченности, соответствующих всему набору предполоводных сработок.

3. Суммируя полученные значения обеспеченностей $P_i(x)$ с весами, равными α_i (колонка 5 в табл. 1), получаем обеспеченность заданного значения максимального расхода в нижнем бьефе (табл. 2).

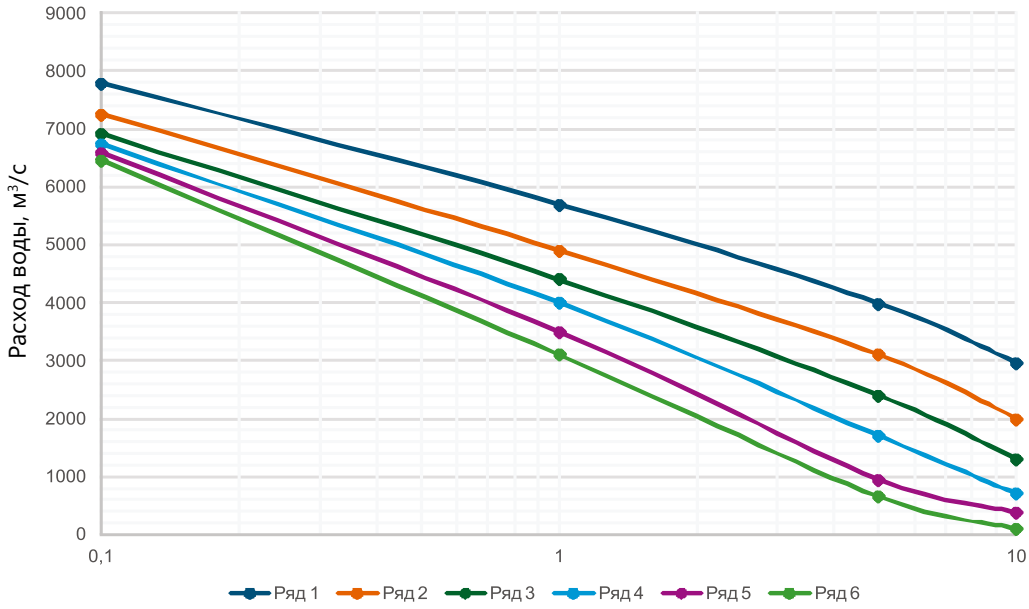


Рис. 3. Кривые обеспеченности максимальных расходов воды в нижнем бьефе Ириклинской ГЭС в зависимости от предполоводной сработки (нумерация в соответствии с табл. 1)
Fig. 3. Probability curves of the water maximal discharge in the Iriklinsk Hydro Power Plant downstream range depending on pre-high-water drawdown (numeration is according to Table 1)

4. Выполнив расчеты согласно п. 2 для нескольких значений расхода воды, получим кривую обеспеченности максимального расхода воды в нижнем бьефе Ириклинского гидроузла с учетом естественной изменчивости стока и различных возможностей предполоводной сработки (рис. 4).

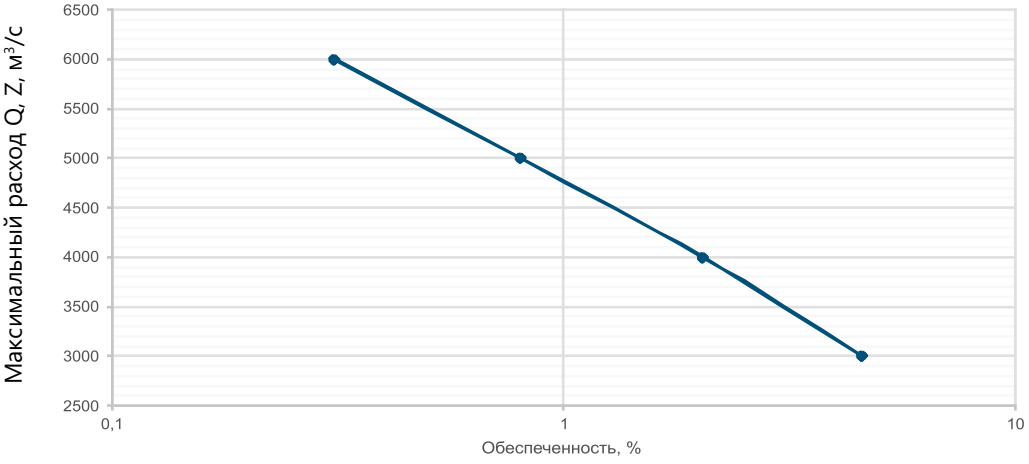


Рис. 4. Кривая обеспеченности максимальных расходов в нижнем бьефе Ириклинского гидроузла
Fig. 4. Probability curve of maximal discharges in the Irklinsk hydro plant downstream range

5. С кривой обеспеченности на рис. 4 снимаем значение вероятности превышения для заданной расчетной обеспеченности.

Применение предложенной методики расчета кривой обеспеченности максимального стока позволяет предложить оценку расхода с обеспеченностью P = 1 %, в соответствии с кривой на рис. 4, в размере 4750 м^3/сек, что несколько больше, чем результат предыдущего подхода.

Таблица 2. Результаты расчета обеспеченности максимального расхода воды в нижнем бьефе по формуле полной вероятности
Table 2. Results of the calculation of the maximal discharge probability in the downstream range according the full probability formula

Расход воды x, м^3/с	Вероятность предполоводной сработки (в долях от единицы)						$P(x)$
	0,014	0,053	0,027	0,171	0,737	0,0	
x = 3000	1,1	1,5	2,0	3,1	5,3	9,5	
$P_i(x)*\alpha_i$	0,016	0,080	0,054	0,513	0,907	0,0	4,57
x = 4000	0,53	0,70	1,00	1,5	2,3	5,0	
$P_i(x)*\alpha_i$	0,008	0,038	0,027	0,257	1,696	0,0	2,03
x = 5000	0,26	0,33	0,42	0,57	0,90	2,0	
$P_i(x)*\alpha_i$	0,004	0,018	0,012	0,098	0,644	0,0	0,80
x = 6000	0,13	0,16	0,18	0,23	0,34	0,70	
$P_i(x)*\alpha_i$	0,002	0,009	0,005	0,004	0,251	0,0	0,31

ВЫВОДЫ

Для определения максимальных расходов воды заданной обеспеченности в нижних бьефах гидроузлов предложены два подхода, учитывающих при выполнении расчетов пропуска половодья (паводка) распределение вероятностей предполоводной сработки емкости водохранилища.

При первом, упрощенном, подходе расход заданной обеспеченности рассматривается как значение, зависящее только от наполнения водохранилища на начало расчета пропуска расчетного половодья той же обеспеченности. Получение расчетного значения максимального стока (квантили распределения) рекомендуется осуществлять путем вычисления математического ожидания этой квантили с приданием расчетным расходам вероятностей, равных вероятностям наполнения (предполоводной сработки).

Более строгий подход основан на том положении, что максимальный расход воды в нижнем бьефе может быть превышен в результате пропуска паводков разной обеспеченности и при разных наполнениях водохранилища на момент начала расчета. Расчетная кривая обеспеченности может быть получена на основе байесовского подхода, который состоит в вычислении прогнозной плотности по формуле полной вероятности.

Для упрощения процедуры расчетов рекомендуется графический метод, хотя сама методика может быть автоматизирована.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов с кем-либо.
CONFLICT OF INTEREST
There is no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л.: Гидрометиздат, 1967. 291 с.
2. Loucks D. P., Stedinger J. R., Haith D. A. Water resource systems planning and analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981. 559 p.
3. Болгов М. В. О функции распределении наполнений и сбросов при расчетах регулирования стока методом стохастического динамического программирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 24–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-24-39
4. Соколовский Д. Л. Речной сток (Основы теории и методики расчетов). 3-е изд., исп. и доп. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 539 с.
5. Maidment David R. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Education, 1993. 1424 p.
6. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М., 1981. 257 с
7. Болгов М. В, Лобанова А. Г. Инженерно-гидрологические расчеты и климатические изменения: как развивать новые подходы // Метеорология и гидрология. № 4. 2025. С. 25–36. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-4-25-36
8. Loucks D. P., van Beek E. An Introduction to Probability, Statistics, and Uncertainty. In book: Water Resource Systems Planning and Management. March 2017. P. 213–300. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1_6
9. Simonovic S. P. Floods in a changing climate: risk management. International hydrology series. Cambridge University Press, 2012. 179 p.

REFERENCES

1. Kartvelishvili N. A. Theory of probabilistic processes in hydrology and regulation of river flow. L.: Hydrometizdat, 1967. 291 p.
2. Loucks D. P., Stedinger J. R., Haith D. A. Water resource systems planning and analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981. 559 p.
3. Bolgov M. V. On the function of distribution of fillings and discharges in the calculations of regulation of flow by the method of stochastic dynamic programming. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 24–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-24-39
4. Sokolovsky D. L. River Flow: (Fundamentals of Theory and Calculation Methods). 3rd edition, revised and expanded. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 539 p.
5. Maidment David R. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Education, 1993. 1424 p.
6. Kritsky S. N., Menkel M. F. Hydrological Foundations of River Flow Management. Moscow, 1981. 257 p.
7. Bolgov M. V, Lobanova A. G. Engineering Hydrological Calculations and Climate Change: How to Develop New Approaches. *Meteorology and Hydrology.* No. 4. 2025. P. 25–36. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-4-25-36

8. Loucks D. P., van Beek E. An Introduction to Probability, Statistics, and Uncertainty. In book: Water Resource Systems Planning and Management. March 2017. P. 213-300. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1_6
9. Simonovic S. P. Floods in a changing climate: risk management. International hydrology series. Cambridge University Press, 2012. 179 p.

Сведения об авторе:

Болгов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, лаборатория моделирования поверхностных вод, отдел поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем РАН», 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3; главный научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, 10а; https://orcid.org/0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

About the author:

Mikhail V. Bolgov, Principal Researcher (PhD, Doctor of Science (habilitation)), Laboratory of Surface Water Modeling, Department of Surface Waters, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, 119333, Russia, Moscow, ul. Gubkina, 3; Principal researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (RosNIIVKh), Russia, 344037, Rostov-on-Don, 10a Chentsova Street;
https://orcid.org/0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 25.12.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 27.01.2026.
Принята к публикации / Accepted 27.01.2026.

УДК 556; 628 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-16-30*

Оригинальная статья/Original paper

Проведение прогнозного моделирования поступления загрязненных грунтовых вод в реку Вятку в рамках трехмерного подхода

Т. П. Любимова, Я. Н. Паршакова

lyubimovat@mail.ru

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Одной из ключевых и методологически сложных задач в экологической гидрогеологии является проблема диффузного загрязнения водоемов. Его источником служат загрязняющие вещества, аккумулированные в геологической среде за долгий период и постепенно выносимые в водные объекты. Особую актуальность этот процесс приобретает в зонах влияния крупных промышленных комплексов, где он имеет характерные черты. К ним относятся высокая интенсивность миграционных потоков, а также специфика генезиса: зачастую загрязнение обусловлено не текущими производственными выбросами, а воздействием «отложенного» или «исторического» экологического ущерба – выносом накопленных в прошлом загрязнений. Именно такая картина наблюдается в бассейне р. Вятки и системе ее пойменных озер, испытывающих значительную нагрузку со стороны Кирово-Чепецкого промышленного узла. **Методы.** Для математического описания миграции загрязняющих веществ в подземных водах использована модель пористой среды, уравнения которой включают в себя член диффузии импульса. Численное решение задачи о транспорте примесей в геологическом массиве основывалось на представлении о ламинарном режиме фильтрации, что справедливо для низких значений числа Рейнольдса. Рассмотрение велось в нестационарной постановке в условиях постоянства температуры. Вычислительная сетка строилась с адаптацией – увеличением плотности узлов в области нижнего водоносного горизонта. **Результаты.** Методом численного моделирования исследован процесс формирования диффузного загрязнения р. Вятки в результате сброса вод из пойменных водоемов (карьеров и озер) в зоне влияния Кирово-Чепецкого промышленного узла. На примере вертикального разреза озера Бобровое 1 определены объемы и скорость поступления соединений азота в речную систему. Полученные данные послужили основой для проектирования природоохранных мер, призванных минимизировать диффузный сток и гарантировать соответствие установленным нормативам качества воды на ключевом питьевом водозаборе г. Кирова.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диффузные источники, отложенное загрязнение, пойма реки Вятки, водозабор, город Киров, численное моделирование

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер 121031700169-1.

Для цитирования: Любимова Т. П., Паршакова Я. Н. Проведение прогнозного моделирования поступления загрязненных грунтовых вод в реку Вятку в рамках трехмерного подхода // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 16–30. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-16-30; EDN: VIBIYN

© Любимова Т. П., Паршакова Я. Н., 2026

Conducting predictive modeling of contaminated groundwater inflow into the Vyatka River using a three-dimensional approach

Tatiana P. Lyubimova, Yanina N. Parshakova

lyubimovat@mail.ru

Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

ABSTRACT

Relevance. One of the key and methodologically challenging problems in environmental hydrogeology is the problem of diffuse pollution of water bodies. Its source is pollutants accumulated in the geological environment over a long period and gradually released into water bodies. This process is particularly relevant in areas affected by large industrial complexes, where it exhibits specific characteristics. These include the high intensity of migration flows, as well as the specific nature of its genesis: pollution is often caused not by current industrial emissions, but by the impact of "deferred" or "historical" environmental damage—the removal of pollutants accumulated in the past. This is precisely the situation observed in the Vyatka River basin and its floodplain lake system, which are significantly impacted by the Kirovo-Chepetsk industrial hub. **Methods.** To mathematically describe the migration of pollutants in groundwater, a porous medium model was used, the equations of which include a momentum diffusion term. The numerical solution to the problem of impurity transport in a geological massif was based on the concept of laminar filtration, which is valid for low Reynolds numbers. The analysis was conducted in a non-stationary setting under constant temperature conditions. The computational grid was constructed with adaptation—increasing the node density in the region of the lower aquifer. The width of the contaminated lake, which serves as the source, was taken into account by averaging the parameters. **Results.** Numerical modeling was used to study the formation of diffuse pollution of the Vyatka River as a result of water discharges from floodplain reservoirs (quarries and lakes) in the zone of influence of the Kirovo-Chepetsk industrial hub. Using a vertical section of Lake Bobrovoe 1 as an example, the volumes and rate of nitrogen compound influx into the river system were determined. The obtained data served as the basis for designing environmental measures aimed at minimizing diffuse runoff and ensuring that water quality at the key drinking water intake in the city of Kirov meets established standards.

KEYWORDS: diffuse sources, delayed pollution, Vyatka River floodplain, water intake, the city of Kirov, numerical modeling

Financing: This study was conducted within the framework of a state assignment, registration number 121031700169-1.

For citation: Lyubimova T. P., Parshakova Y. N. Conducting predictive modeling of contaminated groundwater inflow into the Vyatka River using a three-dimensional approach. Water Sector of Russia: Problems, Technologies. Management. 2026. No. 1. P. 16–30. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-16-30; EDN: VIBIYN

ВВЕДЕНИЕ

Формирование рассеянного (диффузного) загрязнения водных систем представляет собой результат взаимодействия различных природных механизмов – гидрологических и геохимических – и в значительной степени связано с миграцией загрязняющих веществ из исторически накопленных, а не

современных производственных отходов [1, 2]. Ярким примером служит промышленный узел г. Кирово-Чепецка (Кирово-Чепецкий химический комбинат), расположенный в пойменной зоне р. Вятки. За длительный период работы предприятия здесь был создан комплекс крупных объектов для хранения и нейтрализации отходов. Ключевыми из них являются: специализированный полигон для отходов III–IV классов опасности, трехсекционный накопитель шламов, хранилище меловых хвостов, а также полигон для глубинной изоляции промышленных стоков путем их закачки в подземные горизонты [3]. До 1987 г. сброс промышленных вод осуществлялся непосредственно в поверхностные водоемы. С 1987 г. и по настоящее время применяется технология глубинного захоронения: сточные воды закачиваются в изолированный пласт-коллектор, залегающий на глубине 1,1–1,3 км (интервал 1125–1287 м).

В системе водоснабжения г. Кирова, находящегося в зоне воздействия Кирово-Чепецкого промышленного узла, центральное место занимает Корчемкинский водозабор на р. Вятке. Качество водных ресурсов в районе расположения водозаборных оголовков характеризуется выраженной сезонной динамикой концентраций аммиака, выступающего в роли приоритетного (лимитирующего) загрязнителя. В период межени уровни аммиака стабильно не превышают установленный норматив ПДК в 2 мг/л. Однако в весеннее половодье фиксируется значительный рост концентраций данного соединения, величина которых может достигать 2–4 ПДК. Существенный вклад в формирование загрязненного стока вносят объекты захоронения промышленных отходов, такие как шлакоотвалы и хвостохранилища. Согласно исследованиям [4–6], эти объекты сохраняют потенциал негативного воздействия на экосистемы даже в условиях существенного сокращения производственной активности.

Гидрогеологические условия территории, определяющие закономерности миграции загрязняющих веществ, детально проанализированы в работе [6]. Ключевым фактором, осложняющим процессы фильтрации и массопереноса, является литологическая неоднородность геологического разреза, представленного чередованием проницаемых песчаных и слабопроницаемых суглинистых и глинистых отложений.

Прогресс в понимании механизмов рассеянного загрязнения окружающей среды стал возможен благодаря интеграции методов полевого мониторинга и вычислительного эксперимента. Геохимические исследования [7–9] выявили преобладание в почвах и донных отложениях слабосвязанных (подвижных) форм тяжелых металлов. Эта особенность способствует высокой миграционной активности загрязняющих веществ и их вовлечению в процессы переноса в окружающей среде. В работах [10, 11] продемонстрировано, что важным механизмом распространения загрязнений в подземных и поверхностных водах данного региона является их транспорт в составе коллоидных фракций.

Для выявления источников загрязняющих компонентов, таких как сульфат-ионы, успешно применяются методы изотопного анализа [12, 13]. Анализ экспериментальных данных и построение прогнозных сценариев осуществляются на основе методов математического моделирования. Исходной информацией для таких вычислительных моделей служат данные натурных измерений, среди которых ключевыми являются гидравлические параметры пород (коэффициент фильтрации, пористость). Эти параметры определяются в полевых условиях и в рамках лабораторного анализа отобранных образцов кернов.

Актуальной научно-прикладной задачей является разработка аналитических и численных моделей для промышленных комплексов, расположенных в районах крупных водных объектов [14, 15]. Особое внимание в таких исследованиях уделяется механизмам фильтрационного транспорта жидких фаз из накопителей в грунты и водоносные горизонты [16, 17], а также организации мониторинга состояния гидросферы в зонах влияния промышленных объектов [18–21]. Данные мониторинга свидетельствуют о присутствии повышенных концентраций растворимых компонентов отходов в прилегающих водных средах. Потенциальные повреждения изолирующих барьеров накопителей обусловливают необходимость создания адекватных моделей инфильтрационного загрязнения, способных прогнозировать его динамику и масштабы.

В рамках данной работы рассмотрено поступление диффузного загрязнения в геологической среде в районе объектов Кирово-Чепецкого химического комбината (КЧХК). На основе результатов численного моделирования построена разведочная геомиграционная модель с прогнозной оценкой пространственного и временного распространения аммоний-иона в грунтовых водах (Кировская область). Требуемые входные параметры и условия для проведения численного эксперимента определены исходя из данных натурных измерений.

В формировании гидрохимического режима водных объектов и прилегающих к ним территорий существенную роль играют плотностные стратификационные эффекты, обусловливаемые неоднородностью распределения полей минерализации. При концентрации тяжелого элемента более чем 1 промилле они оказывают большое влияние на характер потока. Такие эффекты не могут быть описаны с помощью гидродинамических моделей в рамках уравнений мелкой воды, для их корректного описания необходимо использование гидродинамических моделей в полной трехмерной негидростатической постановке.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Для анализа миграции загрязняющих веществ в подземных горизонтах используется математическая модель, рассматривающая грунт как сплошную пористую среду. Учитывая доминирование вязкостных сил, течение жидкости описывается в приближении малых чисел Рейнольдса, что позволяет применять линеаризованные уравнения движения с учетом диффузионного перено-

са импульса. Данный подход составляет основу для последующего численного решения задач о конвективно-диффузионном переносе примесей в насыщенных грунтовых пластах:

$$\mathrm{Re} = \mathrm{v}_a h / \nu < 2000, \quad (1)$$

где v_a – средняя скорость потока;

h – характерный размер исследуемой области;

ν – кинематическая вязкость жидкости.

В настоящем исследовании $\mathrm{v}_a = 10^{-7}$ м/с, $h = 2000$ м, $\nu = 1e-06$ м^2/с, при таких параметрах $\mathrm{Re} = 200$. Поэтому моделирование проводилось в рамках ламинарной модели.

Моделирование выполнено с использованием нестационарной изотермической постановки задачи. Для повышения точности расчетов в области, прилегающей к нижнему водоносному горизонту, была построена адаптивная пространственная расчетная сетка с повышенной плотностью узлов. Математическая модель включает систему уравнений движения, которая в тензорной форме записи имеет вид:

$$\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mathrm{v}_i) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{m}\rho \mathrm{v}_i\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{1}{m^2}\rho \mathrm{v}_i \mathrm{v}_j\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu}{m}\left(\frac{\partial \mathrm{v}_i}{\partial x_j}\right)\right] - \frac{\mu}{K}\mathrm{v}_i + \rho g_i, \quad (3)$$

где m, K – пористость и проницаемость пористой среды соответственно;

ρ – плотность жидкости;

v_i – компоненты вектора скорости (i = 1, 2, 3);

μ – кинематическая вязкость жидкости. Плотность считалась зависящей от минерализации воды по линейному закону $\rho = \rho_0 + 0{,}702s$ кг/м^3, где $\rho_0 = 1000{,}196$ кг/м^3 – плотность чистой воды и s – измеренная в промилле массовая концентрация растворенных в воде солей.

Уравнение переноса примеси имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho c) + \nabla \cdot (\rho \vec{\mathrm{v}} c) = -\nabla \cdot \vec{J}. \quad (4)$$

Здесь $\vec{J}$ – диффузионный поток примеси, определяемый выражением:

$$\vec{J} = -\rho D_m \nabla c, \quad (5)$$

где D_m – заданный коэффициент молекулярной диффузии.

На твердых границах расчетной области задаются условия прилипания и отсутствия потока вещества:

$$\mathrm{v}_x = \mathrm{v}_y = \mathrm{v}_z = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0. \quad (6)$$

На свободной поверхности жидкости ставились условия недеформируемости, граница считалась свободной от касательных напряжений (равенство нулю нормальной компоненты скорости и касательных напряжений) и условие отсутствия потока вещества:

$$(\vec{v}\,\vec{n}) = 0, \quad (\overline{\overline{\sigma}}\,\vec{\tau}) = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0. \tag{7}$$

На границах расчетной области, которые являются продолжением пористой среды, задаются «мягкие» граничные условия – равенство нулю производных по нормали:

$$\frac{\partial v_i}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0. \tag{8}$$

Входная граница расчетной области располагается, как правило, перпендикулярно основному потоку, на ней задаются скорость потока V и концентрация примеси:

$$v_x = V, \quad v_y = v_z = 0, \quad c = c_0. \tag{9}$$

На выходе расчетной области ставились условия баланса массы и непрерывности потока вещества:

$$\int_{S_{in}} \rho v_{in} dS - \int_{S_{out}} \rho v_{out} dS = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = const. \tag{10}$$

На основании данных полевых измерений на входной границе расчетной области принято условие, что характерная концентрация аммоний-иона в грунтовых водах вблизи хранилища составляет минимум ~ 10 г/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования выполнено трехмерное численное моделирование динамики распространения загрязняющих веществ в системе «озера-накопители (поверхностные водные объекты) и источники жидких отходов (подземные воды)».

Для моделирования брали часть геологической среды, представляющую параллелепипед длиной 2000 м, шириной 1400 м, глубиной 12 м (рис. 1). Рассматривался процесс фильтрации воды с содержанием азота аммонийного. На входе расчетной области задавалась постоянная скорость потока 10^{-7} м/с в водоносном слое толщиной 7 м проницаемостью 1e–13 м^2, 1e–08 м/с в слое над водоносным горизонтом толщиной 5 м проницаемостью 1e–14 м^2. Пористость горных пород принималась равной 0,2. В начальный момент времени задавалось нулевое значение для концентрации во всей расчетной области.

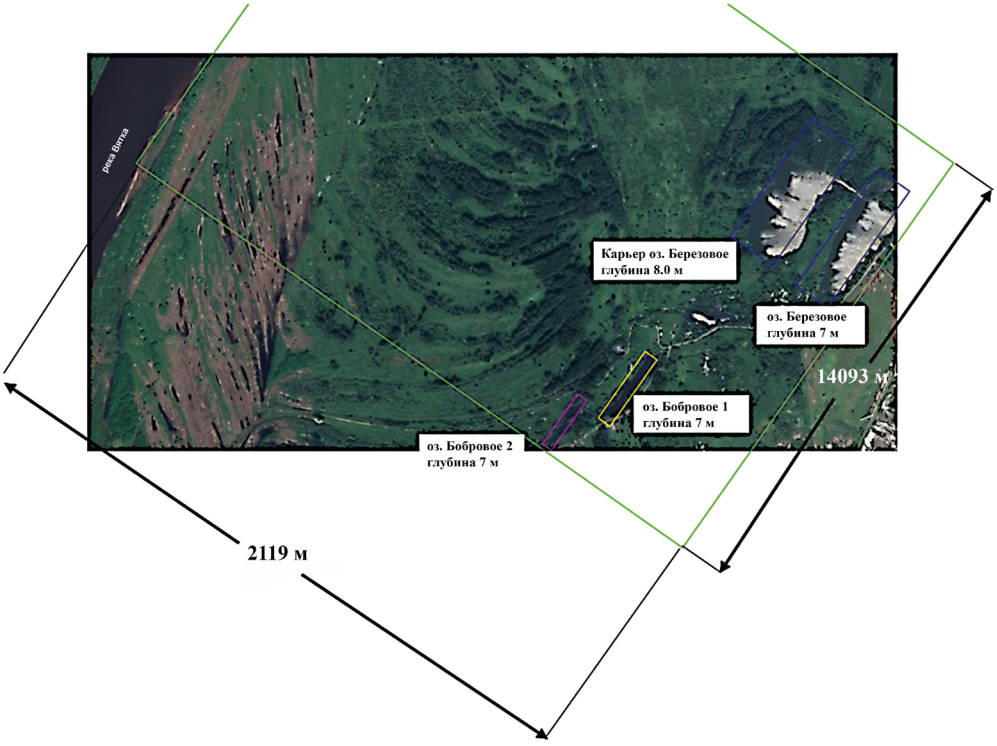


Рис. 1. Расчетная область
Fig. 1. Area to be calculated

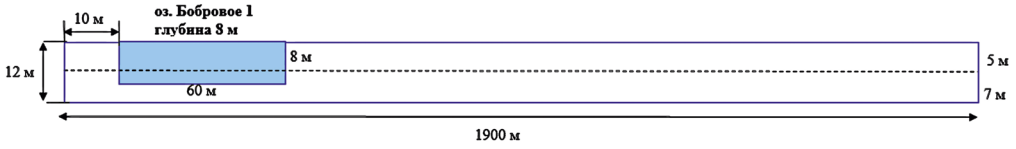


Рис. 2. Вертикальное сечение от оз. Бобровое 1 до р. Вятки
Fig. 2. Vertical section from the Lake Bobrovoe 1to the Vyatka River

С целью детального исследования пространственно-временной эволюции антропогенного загрязнения гидрогеологической системы были визуализированы и проанализированы двумерные поля концентрации загрязняющих веществ в центральном вертикальном сечении оз. Бобровое 1 (рис. 2), соответствующие различным ключевым моментам моделирования. Полученные графические материалы позволяют проследить динамику процесса от начального проникновения до формирования устойчивого загрязненного потока. На рис. 3, в свою очередь, представлена поэтапная, во временном разрезе, миграция загрязняющих веществ в системе грунтовых вод, непосредственно связанных с озером, что раскрывает механизм взаимодействия поверхностного водоема и подземной гидросферы.

Проведенный анализ накопленных данных однозначно свидетельствует о том, что начальное проникновение концентрационного фронта загрязнения из грунтовых вод в водную толщу озера выступает в роли триггера, иници-

ирующего развитие интенсивных конвективных течений. Эти течения вызваны возникновением значительных градиентов плотности: более плотная вода, обогащенная растворенными веществами, начинает опускаться, вытесняя и перемешивая менее плотные придонные воды. Данный физический процесс катализирует и многократно интенсифицирует вертикальное и горизонтальное перемешивание водной массы, что приводит к резкому, практически скачкообразному, росту концентрации аммонийного азота во всем объеме озера за чрезвычайно короткий по геоэкологическим меркам интервал – всего несколько месяцев. Таким образом, итогом описанного конвективного механизма является качественный переход экосистемы озера из состояния потенциального приемника загрязнения в статус активного, устойчивого источника вторичного загрязнения для окружающей среды.

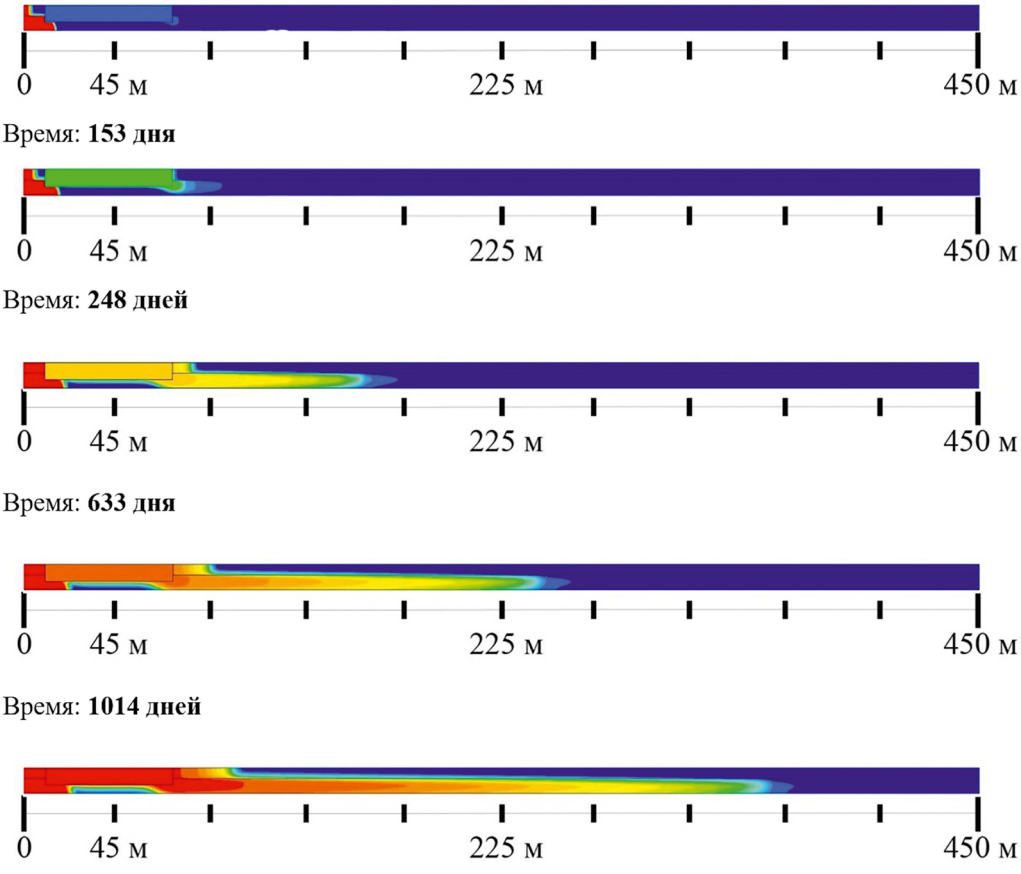


Рис. 3. Временная эволюция поля концентрации азота аммонийного в вертикальном сечении посередине оз. Бобровое 1. Шкала представлена в г/л
Fig. 3. Evolution in time of the ammonium nitrogen concentration in the vertical section in the middle of the Lake Bobrovoe 1. The scale is presented in g/l

Скорость продвижения исходного концентрационного фронта от места фильтрации из хранилища через геологическую среду относительно невелика и составляет величину порядка 10^(–6) м/с. В абсолютных значениях это означает, что за первые три месяца моделирования зона загрязнения распространяется в грунтах примерно на 1 м. Однако ситуация кардинально меняется при достижении фронтом водного объекта с неизолированными, проницаемыми берегами, каким является оз. Бобровое 1.

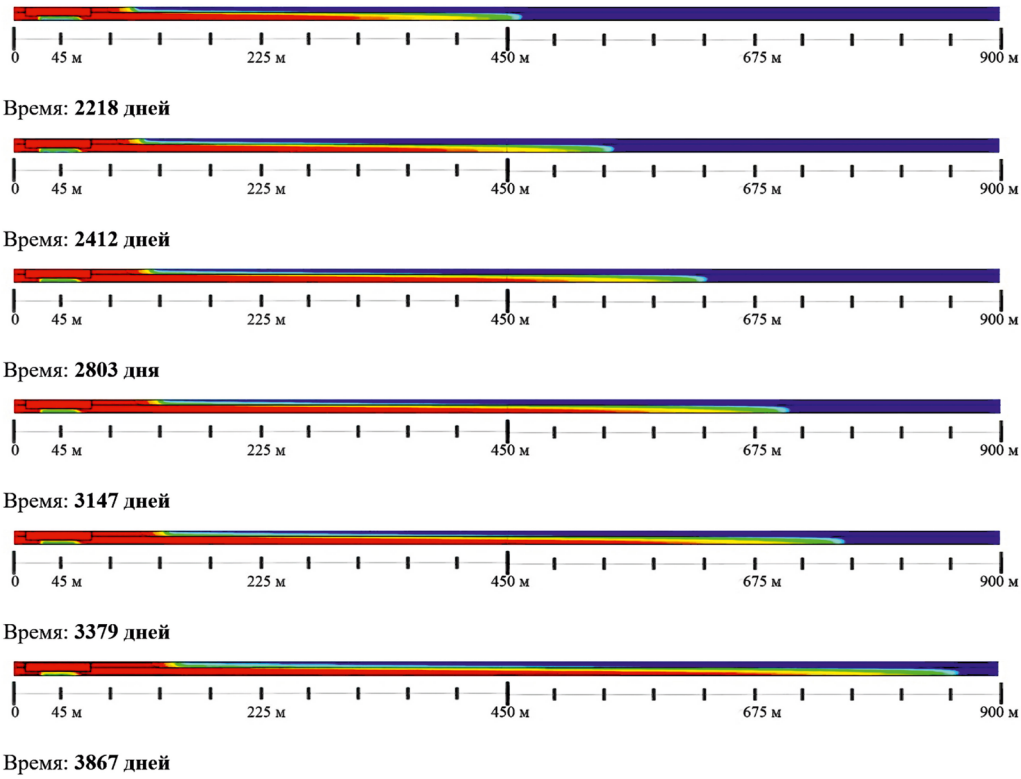


Рис. 4. Временная эволюция поля концентрации рассолов в вертикальном сечении посередине оз. Бобровое 1 через шесть лет от начала расчетов
Fig. 4. Temporal evolution of the brine concentration field in a vertical section in the middle of Lake Bobrovoe 1 six years after the start of calculations

В этом случае возникает двунаправленный процесс: загрязняющая примесь начинает активно распространяться из озера по водоносному горизонту, одновременно продолжая накапливаться в самой озерной воде. В результате уже спустя шесть месяцев после момента достижения концентрационным фронтом береговой линии озера ареал загрязнения в грунтовых водах расширяется до 15 м от уреза воды, а концентрация в эпицентре выброса достигает высоких значений, порядка 4 г/л, что наглядно отображено на рис. 3.

Для оценки долгосрочных и крупномасштабных последствий на рис. 4 представлено поле концентрации в вертикальном сечении, проходящем через

центр оз. Бобровое 1, в масштабе всей расчетной области (горизонтальный охват 0–900 м) после шести лет с момента начала миграции примеси. Визуализация демонстрирует, что сформировавшийся мощный шлейф загрязнения продолжает устойчиво распространяться в пределах водоносного слоя грунтовых вод, следуя региональному гидродинамическому градиенту. Полученная модель указывает на необратимость и значительную пространственную протяженность воздействия, превращая локальный источник в региональную экологическую угрозу для всей связанной гидрологической системы.

На основе полученных данных проведена оценка увеличения количества азота аммонийного в озерах за 100 дней, получено $5 \cdot 10^3$ т.

Рассмотрен также случай, когда в начальном состоянии имелось линейное распределение примеси от 10 г/л до 0 г/л на расстоянии 400 м (рис. 5*а*).

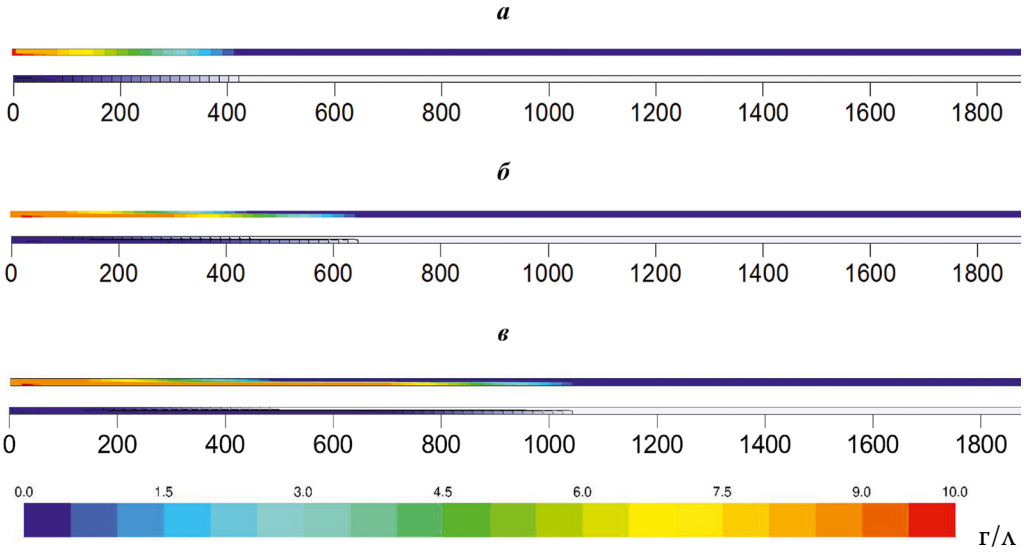


Рис. 5. Распределение фронта концентрации: *а* – начальное распределение концентрации, t = 0; *б* – распределение концентрации через t = 1029 дней (2 года 9 мес.); *в* – распределение концентрации через t = 2878 дней (7 лет 10 мес.)
Fig. 5. The concentration front distribution: *а* is the original concentration distribution, t = 0; *б* is the concentration distribution after t = 1029 days (2 years and 9 months); *в* is the concentration distribution after t = 2878 days (7 years and 10 months)

Показано, что при постоянном поступлении примеси с концентрацией 10 г/л ее объем в озере не меняется и составляет 10 г/л. Фронт концентрации при этом за 2 года 9 месяцев распространяется на 210 м (рис. 5*б*) и преодолевают расстояние в километр за семь с половиной месяцев (рис. 5*в*).

Разработанная трехмерная гидродинамическая модель, учитывающая диффузию примеси в пористой среде и концентрационно-конвективный перенос, применена для исследования формирования диффузного загрязнения. Модель корректно воспроизводит влияние плотностной стратификации, что критически важно при прогнозировании миграции высокоминерализованных

растворов и не может быть достигнуто с помощью упрощенных двумерных или гидростатических постановок. Расчеты для участка оз. Бобровое 1 продемонстрировали механизм формирования «отложенного» загрязнения. Установлено, что пойменные озера, аккумулируя поступающие из геологической среды загрязняющие вещества (в частности, аммонийный азот), приводят к усилению распространения диффузного загрязнения. Моделирование количественно показало, что наличие такой аккумулирующей емкости (озера) ускоряет распространение фронта загрязнения в водоносном горизонте на порядок (с ~ 1,5 м/полгода до ~ 15 м/полгода), значительно усугубляя экологическую ситуацию.

Полученные прогнозные картины пространственно-временного распространения загрязнения, оценка интенсивности поступления азотсодержащих соединений (например, увеличение на $5 \cdot 10^3$ т за 100 дней в рассмотренном сценарии) легли в основу разработки конкретных природоохранных мероприятий. Эти меры направлены как на локализацию и снижение диффузного стока, так и на обеспечение стабильного нормативного качества воды в ключевом объекте – Корчемкинском водозаборе г. Кирова.

ВЫВОДЫ

В формировании гидрохимического режима водных объектов и прилегающих к ним территорий существенную роль играют плотностные стратификационные эффекты, обусловливаемые неоднородностью распределения полей минерализации. При концентрации тяжелого элемента более одного промилле эти эффекты оказывают большое влияние на характер потока. Такие эффекты не могут быть описаны с помощью гидродинамических моделей в рамках уравнений мелкой воды, для их корректного описания необходимо использование гидродинамических моделей в полной трехмерной негидростатической постановке. В связи с этим актуальна разработка гидродинамических моделей, описывающих транспорт загрязнений и позволяющих прогнозировать изменения экологической обстановки в течение длительных периодов. Также важной задачей является оценка влияния на гидросферу полигонов бытовых и промышленных отходов ввиду их больших размеров и высоких рисков проникновения загрязнений в грунтовые воды с осадками и талыми водами.

В представленной работе исследовано формирование гидрохимического режима водных объектов и прилегающих к ним территорий с существенной ролью плотностных стратификационных эффектов, обусловленных неоднородностью распределения полей минерализации. При концентрации тяжелого элемента более одного промилле эти эффекты оказывают большое влияние на характер потока. Путем численного моделирования исследован процесс формирования диффузного загрязнения в бассейне р. Вятки, индуцированный се-

зонной промывкой пойменных водоемов (затопленных карьеров, озер) в зоне влияния Кирово-Чепецкого промышленного узла. Основное внимание уделено оценке объемов и динамики поступления соединений азота, в частности аммонийного азота.

Моделирование учитывало инфильтрацию загрязненных осадков через геологическую среду от накопителей твердых отходов. Установлено, что концентрационный фронт мигрирует в водоносном горизонте мощностью 7 м и проницаемостью $1 \cdot 10^{-13}$ м^2 со скоростью фильтрационного потока $1 \cdot 10^{-7}$ м/с. При выходе этого фронта к акватории пойменного озера активизируются процессы концентрационно-конвективного переноса, приводящие к интенсивному перемешиванию водной массы. В результате за период в несколько месяцев происходит значительное накопление аммонийного азота, трансформирующее озеро из потенциального приемника в активный вторичный источник загрязнения.

Ключевым выводом является различие в скорости распространения загрязняющих веществ. В поровом пространстве грунтов фронт продвигается со скоростью ~ $1 \cdot 10^{-7}$ м/с, что соответствует 1,5 м за полгода. Однако при поступлении в открытый водоем с незащищенными берегами, где включаются механизмы конвективного переноса и боковой миграции, зона влияния расширяется на расстояние до 15 м за тот же период после достижения фронтом уреза воды. Таким образом, наличие гидравлически связанных с подземным потоком озер приводит к увеличению скорости распространения загрязнения.

Описание применения генеративной модели: Программы на основе искусственного интеллекта не привлекались.

Description of a generative model application: Artificial intelligence-based programs were not used.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филимонов В. Ю., Ловцкая О. В. Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек. Сообщение 2. Влияние числа измерений на результаты расчета обратной задачи // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 5–18. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18
2. Alekseenko V. A., Maximovich N. G., Alekseenko A. V. Geochemical Barriers for Soil Protection in Mining Areas // Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils. 2017. P. 255–274. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809588-1.00009-8

3. О состоянии окружающей среды Кировской области в 2024 году. Региональный доклад / под ред. Т. Э. Абашева. Киров, 2025. 195 с.
4. Адамович Т. А., Скугорева С. Г., Кантор Г. Я., Ашихмина Т. Я. Экологическое состояние природного комплекса на территории вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината // Проблемы региональной экологии. 2010. № 3. С. 197–205.
5. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд. М.: Недра, 1998. 366 с.
6. Шварцев С. Л. Созидательная функция воды в формировании окружающего нас мира // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1275–1291. https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0395
7. Особенности формирования и масштаб диффузного загрязнения пойменных озер в районе Кирово-Чепецкого промышленного комплекса / Ю. С. Ляхин, А. В. Богомолов, А. П. Лепихин, А. А. Возняк // Горное эхо. 2020. № 2 (79). С. 3–10. https://doi.org/10.7242/echo.2020.2.1
8. Лепихин А. П., Ляхин Ю. С. Влияние «отложенных» загрязнений на формирование гидрохимического режима водных объектов (на примере промышленного комплекса г. Кирово-Чепецк) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 3. С. 58–69. https://waterjournal.ru/files/wj/1621841371.pdf
9. Клецкина О. В., Красильников П. А., Татаркин А. В. Гидрогеохимическая оценка состояния поверхностных вод и выделение зоны влияния объекта размещения отходов в пределах Кирово-Чепецкого промышленного комплекса // Вестник Пермского университета. Геология. 2022. Т. 21. № 2. С. 180–189. https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.2.180
10. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Motusova G. N., Burachevskaya M. V., Nazarenko O. G., Sushkova S. N., Kizilkaya R. Heavy metal compounds in a soil of technogenic zone as indicate of its ecological state // Eurasian Journal of Soil Science. 2014. Vol. 3. No. 3. P. 144–151. https://doi.org/10.18393/ejss.60429
11. De Jonge L. W., Kjaergaard C., Moldrup P. Colloids and Colloid-Facilitated Transport of Contaminants in Soils: An Introduction // Vadose Zone Journal. 2004. Vol. 3. No. 2. P. 321–325. https://doi.org/10.2113/3.2.321
12. De Jonge L. W., Kjaergaard C., Moldrup P. Colloids and Colloid-Facilitated Transport of Contaminants in Soils // Vadose Zone Journal. 2004. Vol. 3. No. 2. P. 321–325. https://doi.org/10.2136/vzj2004.0321
13. Xie X., Wang Y., Ellis A., Li J., Su C., Duan M. Multiple isotope (O, S and C) approach elucidates the enrichment of arsenic in the groundwater from the Datong Basin, northern China // Journal of Hydrology. 2013. Vol. 498. P. 103–112. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.024
14. Zheng C., Bennett G. D. Applied Contaminant Transport Modeling. 4th ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2020.
15. Berkowitz B., Dror I., Yaron B. Contaminant Geochemistry. Berlin: Springer, 2008. 412 p.
16. Polubarinova-Kochina P. Ya. Theory of Ground Water Movement. Princeton: Princeton University Press, 1962. 613 p.
17. Bear J., Cheng A. H.-D. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Amsterdam: Springer, 2010. 834 p.
18. Anderson M. P. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. New York: Academic Press, 1992. 381 p.
19. Lepikhin A. P., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Tiunov A. A. Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works // Journal of Mining Science. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 390–397. https://doi.org/10.1134/S1062739148020220
20. Nield D. A., Bejan A. Convection in Porous Media. 4th ed. Berlin: Springer, 2013. 778 p.
21. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Nonlinear Regimes of the Soret-Induced Convection of Ternary Fluid in a Square Porous Cavity // Transport in Porous Media. 2019. Vol. 127. No. 3. P. 559–572. https://doi.org/10.1007/s11242-018-1211-2

REFERENCES

1. Filimonov V. Yu., Lovtskaya O. V. Semi-empirical method for calculating the diffuse runoff of conservative pollutants in sections of small lowland rivers. Report 2. Influence of the number of measurements on the results of calculating the inverse problem. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 2. P. 5–18. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18
2. Alekseenko V., Maximovich N., Alekseenko A. Geochemical Barriers for Soil Protection in Mining Areas. *Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils.* 2017. P. 255–274. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809588-1.00009-8
3. About the state of Kirov Oblast environment in 2024. Regional report / edited by T. E. Abashev. Kirov, 2025. 195 p.
4. Adamovich T. A., Skugoreva S. G., Kantor G. Ya., Ashikhmina T. Ya. Ecological state of the natural complex in the area near the Kirovo-Chepetsk Chemical Plant. *Problems of Regional Ecology.* 2010. No. 3. P. 197–205.
5. Shvartsev S. L. Hydro/geochemistry of the hypergenesis zone. 2nd ed. M.: Nedra, 1998. 366 p.
6. Shvartsev S. L. The creative function of water in the formation of the world around us. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. Vol. 9. No. 4. P. 1275–1291. https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0395
7. Lyakhin Yu. S., Bogomolov A. V., Lepikhin A. P., Voznyak A. A. Features of the formation and scale of diffuse pollution of floodplain lakes in the area of the Kirovo-Chepetsk industrial complex. *Mining Echo*. 2020. No. 2 (79). P. 3–10. https://doi.org/10.7242/echo.2020.2.1
8. Lepikhin A. P., Lyakhin Yu. S. The influence of "deferred" pollution on the formation of the hydrochemical regime of water bodies (on the example of the industrial complex of Kirovo-Chepetsk). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2011. No. 3. P. 58–69. https://waterjournal.ru/files/wj/1621841371.pdf
9. Kletskina O. V., Krasilnikov P. A., Tatarkin A. V. Hydro/geochemical assessment of surface water condition and identification of the influence zone of a waste disposal facility within the Kirovo-Chepetsk industrial complex. *Bulletin of Perm University.* Geology. 2022. Vol. 21. No. 2. P. 180–189. https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.2.180
10. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Motusova G. N., Burachevskaya M. V., Nazarenko O. G., Sushkova S. N., Kizilkaya R. Heavy metal compounds in a soil of technogenic zone as indicate of its ecological state. *Eurasian Journal of Soil Science.* 2014. Vol. 3. No. 3. P. 144–151. https://doi.org/10.18393/ejss.60429
11. De Jonge L. W., Kjaergaard C., Moldrup P. Colloids and Colloid-Facilitated Transport of Contaminants in Soils: An Introduction. *Vadose Zone Journal.* 2004. Vol. 3. No. 2. P. 321–325. https://doi.org/10.2113/3.2.321
12. De Jonge L. W., Kjaergaard C., Moldrup P. Colloids and Colloid-Facilitated Transport of Contaminants in Soils. *Vadose Zone Journal.* 2004. Vol. 3. No. 2. P. 321–325. https://doi.org/10.2136/vzj2004.0321
13. Xie X., Wang Y., Ellis A., Li J., Su C., Duan M. Multiple isotope (O, S and C) approach elucidates the enrichment of arsenic in the groundwater from the Datong Basin, northern China. *Journal of Hydrology.* 2013. Vol. 498. P. 103–112. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.024
14. Zheng C., Bennett G. D. Applied Contaminant Transport Modeling. 4th ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2020.
15. Berkowitz B., Dror I., Yaron B. Contaminant Geochemistry. Berlin: Springer, 2008. 412 p.
16. Polubarinova-Kochina P. Ya. Theory of Ground Water Movement. Princeton: Princeton University Press, 1962. 613 p.
17. Bear J., Cheng A. H.-D. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Amsterdam: Springer, 2010. 834 p.
18. Anderson M. P. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. New York: Academic Press, 1992. 381 p.

19. Lepikhin A. P., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Tiunov A. A. Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works. *Journal of Mining Science.* 2012. Vol. 48. No. 2. P. 390–397. https://doi.org/10.1134/S1062739148020220
20. Nield D. A., Bejan A. Convection in Porous Media. 4th ed. Berlin: Springer, 2013. 778 p.
21. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Nonlinear Regimes of the Soret-Induced Convection of Ternary Fluid in a Square Porous Cavity. *Transport in Porous Media.* 2019. Vol. 127. No. 3. P. 559–572. https://doi.org/10.1007/s11242-018-1211-2

Сведения об авторах:

Любимова Татьяна Петровна, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики, ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН), Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; https://orcid.org/0000-0002-8212-2890; e-mail: lubimova@psu.ru

Паршакова Янина Николаевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН), Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; https://orcid.org/0000-0002-0234-3854; e-mail: parshakova@icmm.ru

About the authors:

Tatyana P. Lyubimova, Professor, Doctor of Physical/Mathematical Sciences, Head of the Computational Fluid Dynamics Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMSS UB RAS), 1, Akad. Korolev St., Perm, 614013, Russia; https://orcid.org/0000-0002-8212-2890; e-mail: lubimova@psu.ru

Yanina N. Parshakova, Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMSS UB RAS), 1, Akad. Korolev St., Perm, 614013, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0234-3854; e-mail: parshakova@icmm.ru

Поступила в редакцию / Received 01.11.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 25.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 14.01.2025.

УДК 556; 552 (476) *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-31-56*

Оригинальная статья/Original paper

Водохозяйственный баланс водохранилища «Светлогорское»

А. А. Волчек, С. И. Парфомук, С. В. Сидак, Н. Н. Шешко, Н. Н. Шпендик

harchik-sveta@mail.ru

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование водохозяйственного баланса водохранилища «Светлогорское» является актуальным как с практической, так и с научной точек зрения, поскольку результаты работы будут способствовать рациональному использованию водных ресурсов и устойчивому развитию региона. **Методы.** В работе использованы методы расчета водного баланса, определения экологического стока, а также методы определения основных характеристик временных рядов гидрологических данных. **Результаты.** Дана современная оценка водных ресурсов рек Березины и Сведи. Выполнен водохозяйственный баланс водохранилища «Светлогорское». Определены объемы изъятия воды из рек Березины и Сведи на нужды водохранилища. В качестве оценки допустимых объемов изъятия принята разница стока расчетной обеспеченности (75 %) и величины стока данной обеспеченности, вычисленной методом переноса обеспеченностей. Это позволяет наиболее объективно оценить объем забора воды, оказывающий минимальное воздействие на естественный гидрологический режим реки. Общий объем забора из р. Березины составил 37 720 тыс. м^3, из р. Сведи – 3673,71 тыс. м^3. Рассмотрены экологические риски, связанные с климатическими изменениями. Представлены перспективные направления развития исследований и водохозяйственного мониторинга Светлогорского водохранилища.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водохранилище, водохозяйственный баланс, водопользование, сток, экологический сток, климатические изменения, прогноз, риски

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Х25КИ-036).

Для цитирования: Волчек А. А., Парфомук С. И., Сидак С. В., Шешко Н. Н., Шпендик Н. Н. Водохозяйственный баланс водохранилища «Светлогорское» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 31–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-1-31-56; EDN: SZEVQK

© Волчек А. А., Парфомук С. И., Сидак С. В., Шешко Н. Н., Шпендик Н. Н., 2026

Water management balance of the Svetlogorskoye reservoir

Aleksandr A. Volchek, Sergey I. Parfomuk, Svetlana V. Sidak, Nikolay N. Sheshko, Natalia N. Shpendik

harchik-sveta@mail.ru

Brest State Technical University, Brest, Belarus

ABSTRACT

Relevance. The study of the water balance of the Svetlogorsk reservoir is relevant from both a practical and scientific point of view, since the results of the work will contribute to the rational use of water resources and the sustainable development of the region. **Methods.** The work used methods for calculating water balance, methods for determining environmental flow, as well as methods for determining the main characteristics of time series of hydrological data. **Results.** A modern assessment of the water resources of the Berezina and Sveda rivers is given. A water management balance of the Svetlogorsk reservoir is completed. The volumes of water withdrawal from the Berezina and Svedi rivers for the needs of the reservoir have been determined. The difference between the calculated security runoff (75 %) and the value of the current security runoff calculated by the security transfer method was used as an estimate of the allowable withdrawal volumes. This allows the most objective assessment of the volume of water intake, which has minimal impact on the natural hydrological regime of the river. The total volume of intake from the Berezina river was 37,720 thousand m^3, from the Sved river – 3,673.71 thousand m^3. The environmental risks associated with climate change are considered. Promising directions for the development of research and water management monitoring of the Svetlogorsk reservoir are presented.

KEYWORDS: reservoir, water management balance, water use, runoff, ecological runoff, evaporation from the water surface, forecast, risks

Financing: The study was carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant No. X25KI-036).

For citation: Volchek A. A., Parfomuk S. I., Sidak S. V., Sheshko N. N., Shpendik N. N. Water management balance of the Svetlogorskoye reservoir. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 1. P. 31–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-1-31-56; EDN: SZEVQK

ВВЕДЕНИЕ

Современное климатическое потепление вызвало учащение и увеличение продолжительности засушливых периодов[1] [1], приводящих к изменениям уровенного режима водоемов [2–5]. В этой ситуации для получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур необходимо дополни-

1 Глобальное потепление // Всероссийский Экологический портал. URL: https://ecoportal.su/public/klimat/view/2110.html (дата обращения: 10.06.2025).

тельное увлажнение, требуется накопить воду в многоводный период, чтобы в засушливый направить ее на полив сельскохозяйственных культур [6] при сохранении объемов экологического стока – важнейшего фактора естественных гео- и экосистем.

Методы оценки экологического стока начали развиваться довольно давно. Первые оценки минимального стока появились в 1940-х годах в США. Их целью было определение минимального стока, обеспечивающего условия для ихтиофауны. Поскольку влияние строительства плотин, выпрямления русел и регулирования стока на биоценозы значительно возросло, к настоящему времени разработано более 200 методов его оценки. Все они могут быть классифицированы по четырем группам: чисто гидрологические методы, методы гидравлической оценки, гидробиологические методы и комплексные методы [7–9].

Следует отметить передовые исследования [10] по оценке экологического стока для 128 крупнейших рек мира, в которых используется модель WaterGAP2. Эта модель позволяет рассчитать весь запас возобновляемых водных ресурсов с использованием уравнения водно-энергетического баланса. Экологический сток здесь определяется как 20–50 % от общего запаса возобновляемых водных ресурсов территории [10]. Однако такие упрощенные методы могут представлять значительную экологическую угрозу, поскольку забор 50 % воды приводит к ухудшению состояния водосборной геосистемы. В исследовательской работе [7] представлен подробный обзор подходов к оценке экологического стока, применяемых сегодня в мире. Авторы анализируют как их преимущества, так и недостатки. Одним из преимуществ является то, что метод может применяться даже при отсутствии наблюдений, показывающих связь расхода воды с биологическим (экологическим) состоянием реки и прилегающей территории.

Равнинный рельеф Беларуси затрудняет создание крупных водохранилищ, поэтому необходим поиск локальных мест аккумуляции воды в прудах или использование в полном объеме существующих водохранилищ.

Водохранилище «Светлогорское» создано на территории бывших торфоразработок южнее города Светлогорска Минской области. Строительство водохранилища было начато в 1980 г., завершение работ планировалось на 1985 г., однако по ряду объективных и субъективных причин затянулось. При запуске водохранилища в эксплуатацию в 1989 г. насосы не смогли его наполнить более чем наполовину от запланированного уровня. С развалом СССР вышла из строя и насосная система водоема, сейчас водохранилище наполняется самотеком из р. Березины.

Площадь наливного водохранилища достигает 14,4 км^2 (в ненаполненном состоянии – 6,3 км^2), длина – 6,6 км, средняя ширина – 2,14 км, максимальная

ширина – 3,15 км. Максимальная глубина водохранилища составляет 4,5 м, в карьерах – до 18 м. Полный объем воды 64,43 млн м^3, полезный – 54,60 млн м^3. Колебание уровня воды в годовом разрезе до 4 м. Водохранилище предназначено для увлажнения сельскохозяйственных угодий на площади 49,8 тыс. га, а также для рыбоводства и рекреации [11].

Ограждающая дамба – земляная, трасса дамбы водоема проходит по озерно-аллювиальной равнине времени валдайского оледенения и по водно-ледниковой равнине днепровского оледенения. Абсолютные отметки поверхности дамбы составляют 130,6–142,6 м, ее длина 15,3 км, однородная, намывная, в теле дамбы предусмотрен трубчатый дренаж из асбестоцементных перфорированных труб диаметром 150–200 мм, крепление откосов – за счет травяного покрова, по гребню – песчано-гравийное покрытие, максимальная высота дамбы – 7,7 м. Для перехвата профильтровавшейся воды из водохранилища вдоль низового откоса дамбы предусмотрены два ловчих канала протяженностью 8587 м и 6983 м с максимальными глубинами 5,4 м и 5,7 м соответственно. Грунтовые воды по трассе дамбы вскрыты на глубине 0,3–4,5 м от поверхности земли.

Наполнение водохранилища производилось за счет стока р. Березины, подача которого к комплексу осуществляется по Светлогорскому магистральному каналу протяженностью холостой части 22,66 км. Забор воды из р. Березины (в период с декабря по май включительно) предусмотрен насосной станцией № 1 с подачей ее в Светлогорский магистральный канал. Наполнение водохранилища осуществляется с помощью насосной станции № 2, которая в вегетационный период также подает воду на увлажнение сельскохозяйственных угодий. Подача воды на увлажняемые системы идет по оросительным каналам общей протяженностью более 49 км.

В 1996 г. строительство водохранилища было приостановлено. Незаконченное строительством водохранилище передано на баланс Светлогорскому ПМС в ноябре 1998 г. Заполненный в 1996 г. объем воды до уровня мертвого объема постепенно уменьшался. Ложе водохранилища превратилось в заболоченную территорию, заросшую древесно-кустарниковой и травяной растительностью на 50–60 %.

Цель настоящего исследования – разработка водохозяйственного баланса водохранилища «Светлогорское» для его реконструкции с учетом современных климатических изменений [12, 13].

В рамках проведенной работы решены следующие задачи:

– определены водные ресурсы р. Березины в створе г. Светлогорска и р. Сведи в створе отбора воды в водохранилище с учетом современных климатических колебаний и антропогенных воздействий;

– установлена потребность в водоснабжении сельскохозяйственных угодий при современном потеплении климата;

– дана прогнозная оценка гидролого-климатическим показателям;

– апробирована методика определения экологического стока на реках Березине и Сведи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водохозяйственный баланс является основой комплексного использования водных ресурсов водохранилища, его разработка необходима для обеспечения устойчивого водопользования и управления гидротехническими сооружениями[2]. В случае нарушения водохозяйственного баланса могут наступить: гидрологическая нестабильность, ведущая к аномальным уровням воды (переполнению или осушению); ухудшение гидробиологических условий водных объектов, включая эвтрофикацию и дефицит кислорода; нарушение водного режима прилегающих территорий, что может спровоцировать деградацию экосистем; экономические потери при необходимости реконструкции инфраструктуры [14].

Существует несколько методов расчета водохозяйственного баланса, которые применяются в зависимости от целей исследования, доступных данных и особенностей водного объекта. Основные методики включают:

1. Метод водного баланса: основан на уравнении баланса, учитывающем приходные и расходные компоненты водохранилища: атмосферные осадки, приток воды, испарение, фильтрацию и водопотребление.

2. Гидрологический метод: использует данные о стоке рек, осадках и испарении для определения водных ресурсов и их распределения.

3. Метод математического моделирования: основан на построении гидродинамических моделей, учитывающих физические процессы движения воды и взаимодействие с окружающей средой.

4. Метод статистического анализа: применяется для прогнозирования изменений водного баланса на основе многолетних наблюдений и статистических закономерностей.

5. Метод спутникового мониторинга: использует данные дистанционного зондирования для оценки уровня воды, испарения и других параметров.

6. Метод гидрохимического анализа: позволяет оценить качество воды и влияние антропогенных факторов на водохозяйственный баланс.

В настоящее время подходы к разработке водохозяйственного баланса определены ТПК 17.06-03-2008[3], Основное уравнение водохозяйственного баланса имеет вид:

---

2 О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 февр. 2022 г. № 91 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: http://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22200091&p1=1 (дата обращения: 20.06.2025).

3 Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Порядок проведения расчета и оформления водохозяйственных балансов. ТКП 17.06-03-2008 (02120). Минск, 2018. 25 с.

$$B = W_{вх} + W_{бок} + W_{пэв} + W_{вв} + W_{дот} \pm \Delta V - W_{исп} - W_{ф} - W_{у} - W_{пер} - W_{вдп} - W_{кп}, \quad (1)$$

где B – значение баланса на расчетном участке;

$W_{вх}$ – объем стока, поступающий из верхнего течения рассматриваемого водного объекта, м^3;

$W_{бок}$ – объем воды, формирующийся в пределах расчетного участка и представляющий, как правило, боковую приточность;

$W_{пэв}$ – объем водозабора, формирующийся за счет добычи из подземных источников;

$W_{вв}$ – возвратные воды на водохозяйственном участке в виде сточных вод;

$W_{дот}$ – объем воды за счет межбассейновых переброс;

$\pm \Delta V$ – объем воды на наполнение и опорожнение прудов и водохранилищ на расчетном водохозяйственном участке;

$W_{исп}$ – потери на дополнительное испарение в результате увеличения площади водной поверхности;

$W_{ф}$ – потери на фильтрацию из водохранилищ, каналов, других поверхностных водных объектов;

$W_{у}$ – изменение речного стока, обусловленное водозабором из подземных водных объектов, при наличии гидравлической связи с расчетным водным объектом;

$W_{пер}$ – переброска объема воды из расчетного водохозяйственного участка в смежные водосборы;

$W_{вдп}$ – суммарная потребность всех водопользователей в пределах расчетного водохозяйственного участка;

$W_{кп}$ – требуемая величина стока в замыкающем створе расчетного водохозяйственного участка (в первую очередь санитарно-экологические и хозяйственные попуски).

Как и при решении иных инженерно-технических задач, водохозяйственный баланс составляется для нескольких расчетных случаев, что обеспечивает многовариантность[3]. Ключевым элементом решения уравнений водохозяйственного баланса является определение величины попусков, необходимых для нормальной работы водозаборов, поддержания санитарно-экологического состояния реки, обеспечения судоходства, а в отдельных случаях – обводнения пойм и нерестилищ.

Под санитарно-экологическими попусками в настоящее время понимают экологический сток, который представляет собой минимальную величину речного стока, постоянного или переменного в течение года. В первую очередь размер экологического стока должен обеспечить условия существования и развития ихтиофлоры и ихтиофауны, что достигается поддержанием скорости течения воды в достаточно высоких пределах 0,25–0,6 м/с, а глубины русла –

не менее 0,1–3 м. При этом минимальная глубина из диапазона соответствует маловодным периодам (зима, лето). В свою очередь, при средней мощности ледообразования от 17 до 45 см может наблюдаться гибель ихтиофауны по причине недостаточного объема поступающего кислорода в поток (низкая турбулентность и отсутствие участков открытой воды).

При оценке экологического стока необходимо учитывать универсальные подходы:

– *объем, необходимый для нормального развития ихтиофлоры и ихтиофауны.* В этом случае требуется обеспечить скорости течения воды в пределах 0,25–0,6 м/с (0,25 м/с – нижний предел скоростного режима, при котором в значительной степени снижается турбулентность и наблюдается бурное развитие фитопланктона) при глубине потока не менее 0,1 м. Значимыми периодами, с точки зрения средообразующих функций геосистемы, являются маловодные периоды летней и зимней межени;

– *осуществление рекой функций по перемещению вещества и энергии.* Речная сеть транспортирует вещества и энергию, перераспределяя их во времени и в пространстве;

– *внутригодовое колебание стока реки.* Внутригодовая изменчивость стока поддерживает природную цикличность в развитии различных гидробионтов, а также биологических видов в пределах геосистемы реки;

– *многолетняя изменчивость стока реки.* Как и внутригодовая изменчивость, вариация объемов стока за многолетний период позволяет в период затопления обогащать пойменную часть водотока питательными веществами. Одновременно затопление снижает количество гидрофобных растений, заселивших пойму за маловодный период.

В период активного развития промышленного производства в прошлом веке начали широко использовать понятие минимального стока. Однако это в большей степени продиктовано учетом потребностей общества в водных ресурсах. Кроме того, нормирование минимального количества воды, поступающей в нижний бьеф, связано с необходимостью обеспечения водопотребителей в расположенных ниже расчетных створах реки. Конечно, с учетом современного мировоззрения, такие подходы к оценке минимального стока являются неприемлемыми и научно не обоснованными.

В настоящее время существуют различные методы и способы оценки размера экологического стока, которые можно условно разделить на четыре группы. Анализ этих методов выполнен в работах [15, 16], где оценка величины экологического стока проведена по методу повышения обеспеченности, который подразумевает фиксацию нижнего и верхнего предела изменения стока реки.

Наполнение водохранилища «Светлогорское» предусмотрено стоком рек Березины и Сведи. Река Березина – единственный из крупных водотоков (дли-

на 615 км), который от истока до устья протекает по территории Беларуси. Площадь водосбора – 24 650 км². Водосбор грушевидной формы, асимметричный, более развито правобережье.

Березина – третий по величине и водности приток Днепра, водосбор реки расположен в пределах Верхне-Березинской низины, Центрально-Березинской равнины и Минской возвышенности. Наиболее высокая точка водосбора – гора Маяк с абсолютной отметкой 335 м, а самая низкая – в устье р. Березины – 118 м. Средний уклон водосбора в этой части долины – 0,32 ‰. Среднегодовой расход воды в устье – 142 м³/с. Общий уклон – 69 м. В питании реки преобладают грунтовые воды – 60 % (годовой сток), доля снегового питания – 30 %, дождевого – около 10 %. На р. Березине расположены города Докшицы, Борисов, Березино, Бобруйск и Светлогорск.

Березина относится к категории рек с достаточной самоочищающей способностью. Ее водообильность в меженный период позволяет производить водоотбор на промышленные и коммунальные нужды в размере 6–8 м³/с. Лесами и болотами занято более половины территории водосбора, лесистость водосбора порядка 35 %, общая заболоченность – около 20 % (в т. ч. 16 % заболоченные леса), озерность водосбора – около 1 %. Наиболее крупные озера, через которые протекает р. Березина, Палик и Медзозол.

Гидрологический режим реки изучался на 16 постах. В настоящее время действуют четыре гидрологических поста в створах городов Борисов, Березино, Бобруйск, Светлогорск.

Река Сведь – правый приток Березины, полная длина водотока составляет 49 км. Площадь водосборного бассейна – 625 км², средний уклон реки 0,3 ‰, средний расход воды в устье 2,60 м³/с. Вдоль реки протянулась обширная сеть мелиоративных каналов. В среднем течении Сведь соединена каналом со Светлогорским водохранилищем.

В настоящей работе использованы следующие методы для определения основных гидрологических характеристик, подробно описанных в Техническом кодексе установившейся практики (ТКП)[4] [17]:

– оценка однородности исходных рядов гидрологических наблюдений осуществлялась на основе генетического и статистического анализов;

– расчет основных статистических характеристик для р. Березины проведен по данным наблюдений, для р. Сведи, в связи с отсутствием данных гидрометрических наблюдений, по региональным формулам с применением данных рек-аналогов;

– для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения применялось трехпараметрическое распределение Крицкого – Менкеля;

4 Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. 55 с.

– расчеты внутригодового распределения стока р. Березины в створе г. Светлогорска осуществлялись методом компоновки сезонов по водохозяйственным годам, начинающимся с первого месяца многоводного сезона марта. Для р. Сведи – по типовым региональным схемам в зависимости от водности года.

Климатические условия бассейнов рек Березины и Сведи

Применительно к бассейну р. Березины на основании выполненного анализа климатических данных было отобрано пять ближайших метеорологических станций (Бобруйск, Василевичи, Жлобин, Мозырь, Октябрь), обязательным условием являлось непрерывность рядов наблюдений с 1961 по 2015 г. Исходные климатические данные при этом получены из различных источников, включая открытые информационные ресурсы Всемирной метеорологической организации и других организаций, занимающихся изучением климата, а также из климатических справочников.

Анализ изменения климата за период 1961–2015 гг. позволил сделать следующие обобщенные выводы [18]. Произошло повышение температуры воздуха в среднем по бассейну р. Березины на 1,1 °С, причем наибольшее повышение температуры отмечено в зимний период – на 2,0 °С, наименьшее – в осенний период с максимальным повышением на 0,3 °С (рис. 1).

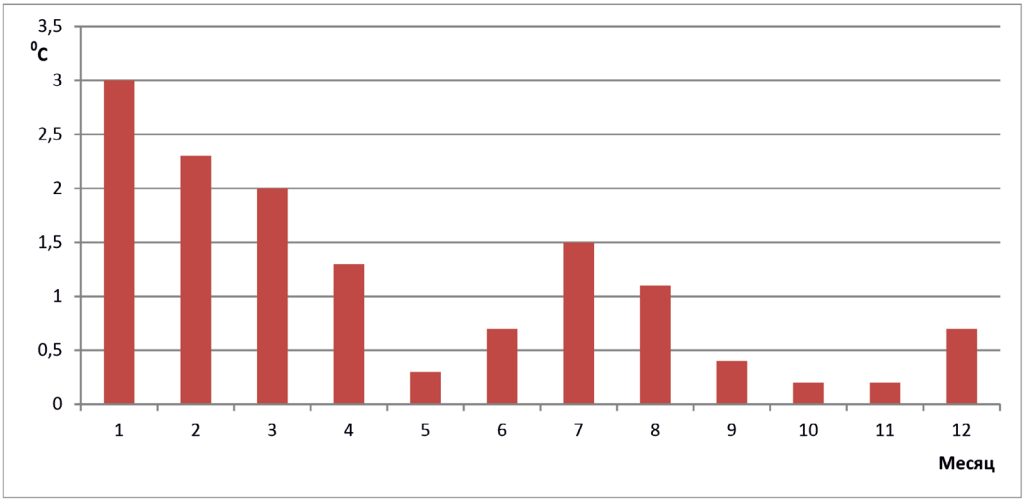


Рис. 1. Внутригодовое (с помесячной градацией) распределение изменения температуры воздуха (°С) за период с 1961 по 2020 г. в бассейне р. Березины
Fig. 1. Intra-annual (with monthly gradation) distribution of air temperature changes (°C) for the period from 1961 to 2020 in the Berezina River basin

Количество осадков в среднем по бассейну р. Березины увеличилось на 4,8 %, при этом наибольшее увеличение отмечено зимой – на 8,6 % (рис. 2).

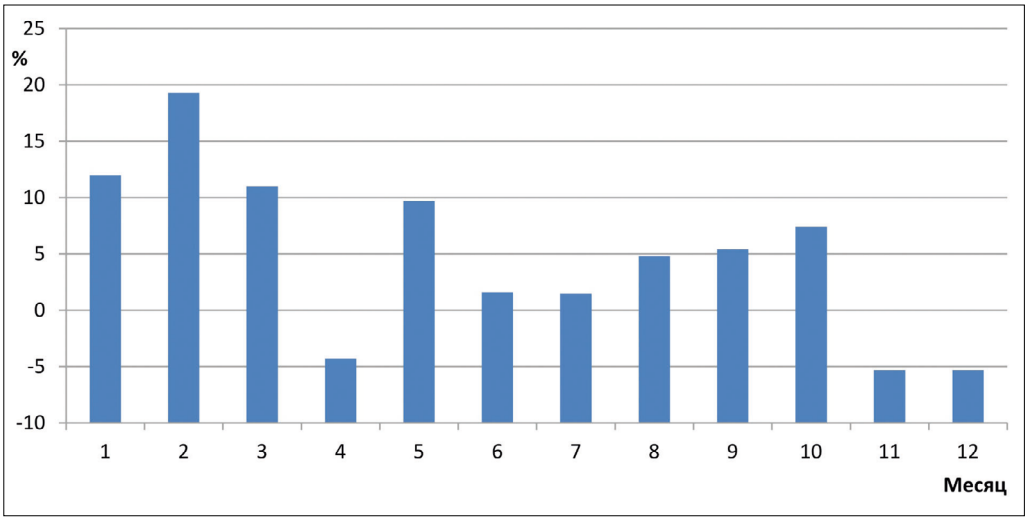


Рис. 2. Внутригодовое (с помесячной градацией) распределение изменения месячного количества осадков (%) за период с 1961 по 2020 г. в бассейне р. Березины
Fig. 2. Intra-annual (with monthly gradation) distribution of changes in monthly precipitation (%) for the period from 1961 to 2020 in the Berezina River basin

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные гидрологические характеристики р. Березины в створе г. Светлогорска определяли непосредственно по данным наблюдений. Пропущенные данные в рядах наблюдений за период 1978–2018 гг. восстановлены с помощью программного комплекса «Гидролог-2» [19]. Данные о количественных характеристиках стока р. Березины в створе Светлогорск и р. Сведь в створе водохранилища представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные гидрологические характеристики стока исследуемых рек
Table 1. Main hydrological characteristics of the flow of the studied rivers

Параметры	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Березина в створе Светлогорск													
Q, м^3/с	121	127	171	265	171	116	101	92,6	89,9	104	116	112	132
C_v	0,37	0,34	0,30	0,45	0,30	0,32	0,39	0,42	0,29	0,30	0,32	0,29	0,22
C_s	0,82	0,77	–0,15	1,06	0,80	1,12	1,22	2,66	1,36	3,13	1,87	1,32	–1,13
$r(1)$	0,11	0,13	0,14	–0,03	0,04	0,08	0,17	0,17	0,12	0,06	0,07	–0,08	0,23
р. Сведь в створе водохранилища													
Q, м^3/с	1,32	1,71	3,06	4,68	2,54	1,42	1,01	0,815	0,896	1,09	1,51	1,29	1,78

Примечание: Q – расход воды, м^3/с; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии; $r(1)$ – коэффициент автокорреляции.

Анализ внутригодового распределения стока р. Березины по месяцам показал, что на весенний период приходится 39 % от годового стока, зимнего стока – 22 %, на летне-осенний сезон – 39 % от годового стока.

При определении гидрологических характеристик р. Сведи использованы региональные методы расчета гидрологических характеристик, основанные на результатах обобщения данных гидрометеорологических наблюдений в соответствии с ТКП[4] [17]. Данные восстановлены по приведенному к многолетнему периоду ряду наблюдений за стоком по реке-аналогу Ведрич в створе Бабичи, а также в расчет приняты значения по картам изолиний, построенным для исследуемого района с учетом последних лет наблюдений и поправок на влияние местных азональных факторов (табл. 1).

На р. Сведи основной сток проходится на весенний период (48 %), зимний сток составляет 20 %, летне-осенний – 32 % от годового стока. Расчет экологического стока осуществлялся по методу повышения обеспеченности, который подразумевает выделение нижнего и верхнего пределов изменения стока на реке. Суть метода подробно описана в работах [15, 16].

В Беларуси в качестве экологического стока принимается значение, равное 75 % от минимального месячного стока 95 %-й обеспеченности, что закреплено нормативно. Но данный подход не в полной мере соответствует вышеперечисленным требованиям, а именно – не обеспечивает анализ внутригодовой изменчивости стока, не учитывает многолетние циклы водности и в большинстве случаев не позволяет учитывать условие соблюдения минимальной скорости течения воды.

По данным многолетних наблюдений за стоком р. Березины размер экологического стока в створе Светлогорск принят как 75 % от минимального месячного стока 95 %-й обеспеченности и составляет 34,7 м^3/с. Если при расчете использовать метод переноса обеспеченностей, экологический сток р. Березины 95 %-й вероятности превышения (обеспеченности), согласно проведенным гидрологическим расчетам, составляет 67,7 м^3/с. Для р. Сведи в качестве значения экологического стока принято значение, равное 75 % от минимального месячного стока 95 %-й обеспеченности, которое составляет 0,332 м^3/с. По методу переноса обеспеченностей экологический сток р. Сведи 95 %-й вероятности превышения (обеспеченности) равен 0,706 м^3/с.

Исследуемая территория находится в области днепровского оледенения, что обусловливает наличие здесь только двух моренных горизонтов – днепровского и березинского. Геолого-генетический комплекс моренных отложений днепровского оледенения в литологическом составе представлен в виде супесей, суглинков, песка пылеватого, мелкого, среднего и, редко, крупного и гравелистого с коэффициентами фильтрации 0,016–7,900 м/сут. Формирование режима подземных вод происходит в основном под влиянием климатических факторов и поверхностных водотоков.

Глубина залегания первого от поверхности горизонта незначительная и, благодаря созданию избыточного увлажнения почвогрунтов в пониженных частях рельефа, способствует заболачиванию. Избыточное увлажнение грунтов связано с незначительными уклонами поверхности земли, а также со слабой врезанностью гидрографической сети, неспособной обеспечить разгрузку накапливающихся подземных и поверхностных вод.

По химическому составу воды гидрокарбонатные, кальциевые и кальциево-магниевые. Дренируются воды реками Припять, Березина и их притоками.

Расчетная линейная схема водохозяйственного участка

Водохозяйственные балансы участков водосборов, для которых технически возможна подача воды из водохранилища «Светлогорское» выполнены с целью оценки имеющихся ресурсов поверхностного стока в год расчетной обеспеченности (P = 75 %) и представлены на рис. 3. Расчеты выполнены по составляющим водного баланса – приходная и расходная части. Гидрологические характеристики реки оценивались по гидрологическим постам наблюдений на р. Березина – г. Бобруйск, р. Березина – г. Светлогорск (табл. 2).

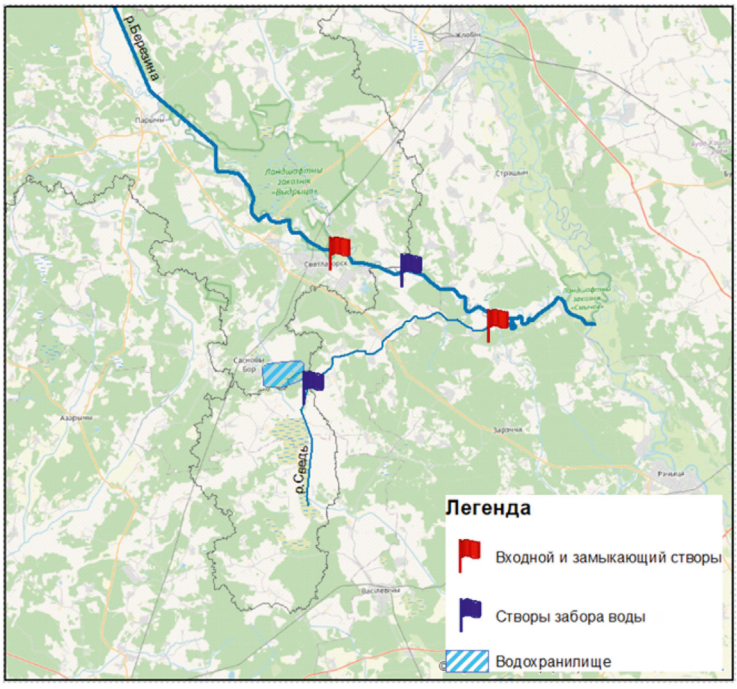


Рис. 3. Расчетная линейная схема водохозяйственного участка
Fig. 3. Calculated linear diagram of the water management area

Анализ структуры поверхностного стока позволил установить основные направления линий стока и возможных участков увлажнения непосредственно из р. Сведи.

Таблица 2. Характеристика водохозяйственного участка р. Березины
Table 2. Characteristics of the water management area of the Berezina River

Створ	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Расход воды, м^3/с				
			Норма стока	C_v	Расчетная обеспеченность, %		
					50	75	95
Борисов	383	5690	35,2	0,18	34,7	31,8	28,5
Бобруйск	167	20 300	114	0,21	115	99,2	75,3
Светлогорск	68	23 300	132	0,22	131	111	82,7

Характеристика водопотребления на водохозяйственном участке в привязке к уровням развития

На берегах р. Березины расположены крупнейшие потребители рекреационных ресурсов – города Борисов, Бобруйск и Светлогорск. У г. Борисова выделены четыре зоны рекреации, вмещающие одновременно до 25 тыс. отдыхающих.

Запасы имеющихся пресных поверхностных и подземных вод Светлогорского района достаточны для удовлетворения не только существующих, но и перспективных потребностей населения и отраслей экономики. Наибольшую нагрузку на р. Березину в створе г. Светлогорска как по объему отводимых очищенных стоков, так и по массе содержащихся в них загрязняющих веществ оказывает ОАО «СветлогорскХимволокно».

Объем подачи воды на увлажнение из водохранилища «Светлогорское» расчетной обеспеченностью 75 % (основной расчет) и 90 %-й обеспеченностью (поверочный расход) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Объем подачи воды на увлажнение из водохранилища «Светлогорское» (75 % обеспеченности, основной, числитель) (90 %-й обеспеченности, поверочный, знаменатель)
Table 3. Volume of water supplied for humidification from the Svetlogorsk reservoir (75 % provision, main, numerator) (90 % provision, verification, denominator)

№№ п.п.	Потребление воды	Потребление воды, тыс. м^3				Итого
		Май	Июнь	Июль	Август	
1	Потребление воды для регулирования почвенной влажности шлюзованием	1854,6 2707,1	8107,0 9840,6	3792,8 10 818,5	9119,0 2072,4	22 873,4 25 438,6
2	Заполнение водоподводящих каналов	372,6 372,6				372,6 372,6
	в т. ч. ВП-1	294,3 294,3				294,3 294,3
	ВП-1-1	57,2 57,2				57,2 57,2
	ВП-2	16,5 16,5				16,5 16,5
	ВП-3	4,6 4,6				4,6 4,6
3	Потери на испарение и фильтрацию по каналам	92,7 135,4	405,4 492,0	189,6 540,9	456,0 103,6	1143,7 1271, 9
Итого		**2319,9 3215,1**	**8512,4 10 332,6**	**3982,4 11 359,4**	**9575,0 2176,0**	**24 389,7 27 083,1**

По результатам водохозяйственных расчетов в пределах данного участка определен график подачи воды из двух основных источников – рек Березины и Сведи. В качестве оценки допустимых объемов изъятия принята разница стока расчетной обеспеченности (75 %) и величины стока данной обеспеченности, вычисленной методом переноса обеспеченностей. Это позволяет наиболее объективно оценить объем забора, оказывающий минимальное воздействие на естественный гидрологический режим реки. Общий объем забора из р. Березины составил 37 720,00 тыс. м^3, из р. Сведи – 3673,71 тыс. м^3. При этом доля снижения стока р. Березины составила около 1 %, что находится в пределах допустимых погрешностей. В свою очередь, в период с февраля по апрель доля снижения экологического стока р. Сведи составила 20 % при допустимых 75 % (табл. 4).

Таблица 4. Водохозяйственный баланс
75 %-й обеспеченности (основной расчетный случай)
Table 4. Water balance at 75 % availability (basic calculation case)

Характеристика	Объем воды, млн м^3												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Березина – Светлогорск													
75 %	268,76	280,73	377,31	586,05	377,67	257,59	223,06	204,89	198,88	229,80	256,46	247,62	3508,82
95 %	199,64	208,53	280,28	435,34	280,55	191,34	165,69	152,20	147,74	170,70	190,50	183,94	2606,45
75 % от мин 95 %	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	1094,30
р. Сведь – в створе водохранилища													
75 %	3,21	3,58	6,02	8,94	4,06	3,07	2,29	1,94	2,62	2,69	2,97	2,99	44,38
эк 75 % перенос	2,57	2,87	4,83	7,16	3,25	2,46	1,84	1,55	2,10	2,16	2,38	2,39	35,58
эк 95 % перенос	1,62	1,75	2,97	4,39	2,05	1,57	1,18	1,00	1,35	1,36	1,48	1,54	22,27
75 % от мин 95 %	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	10,47
Доступно для забора	0,64	0,71	1,19	1,77	0,80	0,61	0,45	0,38	0,52	0,53	0,59	0,59	8,80
Забор насосной № 1			10,00	10,00	9,00	8,72							37,72
Забор насосной № 2	0,00	0,00	9,50	9,50	8,55	8,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,83
Забор насосной № 4 (фильтрация)	0,00	0,00	0,18	0,27	0,35	0,37	0,31	0,23	0,17	0,17	0,16	0,00	2,20
Забор из р. Сведи	0,00	0,71	1,19	1,77									3,67
Итого	0,00	0,71	10,87	11,54	8,90	8,65	0,31	0,23	0,17	0,17	0,16	0,00	41,71
Подача воды на увлажнение	0,00	0,00	0,00	2,32	8,51	3,98	9,58	0,00	0,00	0,00	0,00	24,39	0,00
Наполнение (+),	0,71	10,87	11,54	6,58	0,14	0,00	0,00	0,17	0,17	0,16	0,00	30,34	0,71
Сработка (–) водохранилища	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–3,67	–9,35	0,00	0,00	0,00	0,00	–13,01	0,00

Продолжение таблицы 4

Характеристика	Объем воды, млн м³												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Сброс							0,00	0,00	0,00				0,00
Предварительный объем водохранилища, начало	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–
конец	22,18	22,89	33,76	45,30	51,88	52,02	48,35	39,01	39,18	39,34	39,50	22,18	–
Расчетный объем	22,89	33,76	45,30	51,88	52,02	48,35	39,01	39,18	39,34	39,50	39,50	22,89	–
Расчетная площадь	21,30	26,10	35,84	42,92	44,03	40,00	31,62	25,65	24,70	23,87	22,80	21,30	–
Распределение испарения	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10
Дополнительное испарение	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,28
Потери на испарение	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,04	0,00	3,62
Отметка воды в водохранилище, м	0,00	0,18	0,41	0,55	0,64	0,68	0,35	0,21	0,10	0,00	0,49	0,00	
Фильтрация	0,83	0,81	0,99	1,36	1,63	1,67	1,52	1,20	0,97	0,94	0,91	0,87	13,70
Объем воды на начало месяца	22,18	21,35	21,25	30,95	40,72	45,12	42,94	37,08	26,17	25,16	24,29	23,54	–
на конец месяца	21,35	21,25	30,95	40,72	45,12	42,94	37,08	26,17	25,16	24,29	23,54	22,18	–
Средняя глубина, м	1,76	1,73	2,08	2,73	3,16	3,22	2,98	2,45	2,04	1,98	1,92	1,84	–
Изменение стока в р. Березина, %	0,000	0,000	2,650	1,706	2,383	3,385	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,075
Изменение стока р. Сведи, %	0,000	19,819	19,819	19,819	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,278

Характерные параметры водохранилища

Объем НПУ	45 119,0 млн м³
Объем УМО	21 253,8 млн м³
Объем полезный	23 865,1 млн м³
Средняя глубина при НПУ	3,30 м
Средняя глубина при УМО	1,72 м
Отметка НПУ	134,77 м
Отметка УМО	132,94 м
Разность НПУ и УМО	1,83 м
Мощность полезного объема	1,75 м

Поверочный расчет для года 90 %-й обеспеченности показал достаточность полного объема водохранилища для удовлетворения сельского хозяйства в водных ресурсах, при этом доля забора в стоке р. Березины в расчетном

створе возросла до 1,5 %, что также незначительно влияет на экологическое состояние реки. Начало и график наполнения водохранилища в феврале – мае остается в данном случае без изменений, только в июне забор воды возрастает до 9000 тыс. м^3 и при необходимости наполнение осуществляется в июле в объеме 2200 тыс. м^3. Незначительно снижается максимальный объем наполнения и составляет 44 236,6 тыс. м^3 (табл. 5).

Таблица 5. Водохозяйственный баланс 90 %-й обеспеченности (поверочный расчетный случай)
Table 5. Water balance at 90 % availability (test calculation case)

Характеристики	Объем воды в млн м^3												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Березина – Светлогорск													
75 %	268,76	280,73	377,31	586,05	377,67	257,59	223,06	204,89	198,88	229,80	256,46	247,62	3 508,82
95 %	199,64	208,53	280,28	435,34	280,55	191,34	165,69	152,20	147,74	170,70	190,50	183,94	2 606,45
75 % от мин 95 %	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	91,19	1 094,30
р. Сведь – в створе водохранилища													
75 %	3,21	3,58	6,02	8,94	4,06	3,07	2,29	1,94	2,62	2,69	2,97	2,99	44,38
эк 75 % перенос	2,57	2,87	4,83	7,16	3,25	2,46	1,84	1,55	2,10	2,16	2,38	2,39	35,58
эк 95 % перенос	1,62	1,75	2,97	4,39	2,05	1,57	1,18	1,00	1,35	1,36	1,48	1,54	22,27
75 % от мин 95 %	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	10,47
Доступно для забора	0,64	0,71	1,19	1,77	0,80	0,61	0,45	0,38	0,52	0,53	0,59	0,59	8,80
Забор насосной № 1			10,00	10,00	9,00	9,00	2,20						40,20
Забор насосной № 2	0,00	0,00	9,50	9,50	8,55	8,55	2,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,19
Забор насосной № 4 (фильтрация)	0,00	0,00	0,18	0,27	0,35	0,36	0,27	0,19	0,17	0,16	0,16	0,00	2,11
Забор из р. Сведи	0,00	0,71	1,19	1,77									3,67
Итого	0,00	0,71	10,87	11,54	8,90	8,91	2,36	0,19	0,17	0,16	0,16	0,00	43,97
Подача воды на увлажнение	0,00	0,00	0,00	0,00	3,22	10,33	11,36	2,18	0,00	0,00	0,00	0,00	27,08
Наполнение (+),	0,00	0,71	10,87	11,54	5,68	0,00	0,00	0,00	0,17	0,16	0,16	0,00	29,30
Сработка (–) водохранилища	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–1,43	–9,00	–1,98	0,00	0,00	0,00	0,00	–12,41
Сброс							0,00	0,00	0,00				0,00
Предварительный объем водохранилища, начало	22,18	22,18	22,89	33,76	45,30	50,98	49,55	40,55	38,57	38,74	38,91	39,07	–
конец	22,18	22,89	33,76	45,30	50,98	49,55	40,55	38,57	38,74	38,91	39,07	39,07	–

Окончание таблицы 5

Характеристики	Объем воды в млн м³												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Расчетный объем	21,77	21,30	26,10	35,84	42,48	42,40	35,06	27,86	25,65	24,70	23,87	22,80	–
Расчетная площадь	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	–
Распределение испарения	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,10
Дополнительное испарение	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,04	0,28
Потери на испарение	0,00	0,00	0,18	0,41	0,55	0,64	0,66	0,35	0,21	0,10	0,00	0,49	3,60
Отметка воды в водохранилище, м	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	–
Фильтрация	0,83	0,81	0,99	1,36	1,61	1,61	1,33	1,06	0,97	0,94	0,91	0,87	13,29
Объем воды в водохранилище на начало месяца	22,18	21,35	21,25	30,95	40,72	44,24	40,56	29,57	26,18	25,16	24,29	23,54	–
на конец месяца	21,35	21,25	30,95	40,72	44,24	40,56	29,57	26,18	25,16	24,29	23,54	22,18	–
Средняя глубина, м	1,76	1,73	2,08	2,73	3,13	3,13	2,68	2,20	2,04	1,98	1,92	1,84	–
Изменение стока в р. Березина, %[5]	0,000	0,000	3,568	2,297	3,208	4,704	1,328	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,542
Изменение стока в р. Сведи, %	0,000	40,505	40,149	40,310	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	16,496

Характерные параметры водохранилища

Объем НПУ	44 236,6 млн м³
Объем УМО	21 253,8 млн м³
Объем полезный	22 982,8 млн м³
Средняя глубина при НПУ	3,26 м
Средняя глубина при УМО	1,72 м
Отметка НПУ	134,70 м
Отметка УМО	132,94 м
Разность НПУ и УМО	1,76 м
Мощность полезного объема	1,69 м

Оценка экологических рисков

Современные климатические колебания и антропогенные воздействия, несомненно, оказывают заметное влияние на речной сток, которое с течением времени будет усиливаться. Поэтому необходимы экспертные оценки изменения стока в будущем, основанные на тенденциях прошлых лет.

5 Изменение стока реки рассматривалось относительно стока 95 %-й обеспеченности как наиболее невыгодного.

Оценка изменения стока (расходов воды в р. Березине) выполнена для двух гидрологических постов в среднемесячном и в среднегодовом разрезах для периода с 1986 по 2015 г. по отношению к периоду с 1961 по 1985 г. Итоговые обобщенные результаты по оценке изменения стока с 1961 по 2015 г. в бассейне р. Березины по рассматриваемым гидрологическим постам представлены в табл. 6 и табл. 7 [18].

Таблица 6. Изменения стока в бассейне р. Березины за период с 1961 по 2015 г.
Table 6. Changes in runoff in the Berezina River basin for the period from 1961 to 2015.

Гидрологический пост	Площадь водосбора, км^2	Характеристика	Значения расходов воды за периоды (1986 – 2015 гг.), (1961 – 1985 гг.), м^3/с, разница, %											
			январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Борисов	5690	$Q_{ср}$	28,3	27,6	40,8	84,2	51,0	31,4	24,8	23,0	22,5	26,1	31,0	30,0
		$Q_{1961-1985}$	24,9	21,6	34,5	93,8	51,7	31,2	24,0	23,4	23,0	25,8	30,2	28,5
		$Q_{1986-2015}$	31,1	32,7	46,1	76,3	50,5	31,6	25,5	22,6	22,1	26,4	31,5	31,0
		D	24,7	51,6	33,7	-18,7	-2,3	1,3	6,1	-3,3	-3,8	2,5	4,3	8,9
Бобруйск	20 300	$Q_{ср}$	97,6	99,0	144	265	159	106	90,5	84,2	82,0	90,0	101	97,9
		$Q_{1961-1985}$	89,7	80,8	134	306	167	103	90,0	83,7	82,4	86,4	101	98,4
		$Q_{1986-2015}$	104	114	152	230	153	108	90,9	84,6	81,6	92,8	102	97,4
		D	16,3	41,3	13,6	–24,9	–8,2	4,9	1,0	1,0	–1,1	7,5	0,2	–1,1

Таблица 7. Абсолютные значения характерных расходов воды р. Березины за период с 1961 по 2015 г. (числитель, м^3/с), изменение стока (знаменатель, %)
Table 7. Absolute values of characteristic water discharges (m3/s) of the Berezina River for the period from 1961 to 2015 (numerator), change in runoff, (%) (denominator)

Гидрологический пост	Площадь водосбора, км^2	Средний	Максимальный весеннего половодья	Минимальный летне-осенней межени	Минимальный зимней межени
Борисов	5690	35,1/3,6	112 / –29,7	16,9 / –3,8	19,7 / 20,9
Бобруйск	20 300	118/ –0,9	407 / –40,4	59,3 / 2,6	57,6 / 11,2

По результатам оценок изменения стока за период 1961–2015 гг. можно сделать следующие обобщенные выводы [18]:

– среднегодовой сток р. Березины изменился незначительно с его увеличением на севере на 3,6 % и уменьшением на юге до 1 %;

– произошло значительное снижение стока весеннего половодья от 30 до 40 % с более ранним наступлением его пика;

– отмечено увеличение стока в зимний период: на 21 % по северу и на 11 % по югу бассейна р. Березины;

– сток в летний период изменился незначительно за период 1961–2015 гг., однако в последние годы произошло значительное снижение стока, который был даже меньше минимального за весь указанный период.

Происходящие климатические изменения и антропогенные воздействия не могли не сказаться на режиме испарения с водной поверхности водоемов Беларуси. Анализ месячных величин испарения с водной поверхности по метеостанциям Беларуси свидетельствует о наличии в многолетнем ходе этих значений статистически значимых на 95 %-ном уровне линейных трендов. Количественная оценка изменения временных рядов испарения с водной поверхности осуществлялась с помощью градиентов линейных трендов, значения которых приведены в месячном разрезе. За период май – октябрь наблюдаются статистически значимые уменьшения величин испарения с водной поверхности в бассейне р. Березины. Наибольшие градиенты приходятся на летние месяцы (июнь, июль). Меньшие градиенты отмечены в осенние месяцы, при этом почти все они отрицательные. Полученные результаты свидетельствует о снижении скорости изменения климатических составляющих и о большем вкладе в изменение величин испарения с водной поверхности природной составляющей, чем антропогенной (табл. 8).

Таблица 8. Градиенты (α, мм/10 лет) изменения испарения с водной поверхности и коэффициенты корреляции линейных трендов (r) по метеостанциям Беларуси
Table 8. Gradients (α, mm/10 years) of changes in evaporation from the water surface and correlation coefficients of linear trends (r) for meteorological stations in Belarus

Интервал осреднения	Параметр	
	Градиент (а	Коэффициент корреляции линейных трендов (*r*)
Май	**–3,35 / –3,12***	**–0,31 / –0,31**
Июнь	**–6,56 / –5,08**	**–0,40 / –0,34**
Июль	**–6,74** / –4,21	**–0,38** / –0,26
Август	–1,91 / –1,365	–0,13 / –0,10
Сентябрь	**–2,52** / –1,79	**–0,29** / –0,22
Октябрь	–0,37 / –0,08	–0,10 / –0,02

Примечание: * – в числителе данные работы [20]; выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

Основные факторы, формирующие интенсивность испарения с водной поверхности, – температура воздуха и скорость ветра. Рост температуры воздуха увеличивает скорость испарения с водной поверхности, но скорость ветра уменьшается, и этот вектор в настоящее время оказывает большее влияние на процесс испарения. Кроме того, на испарение с водной поверхности влияют локальные факторы, которые необходимо учитывать при составлении водохозяйственного баланса.

Сценарии изменения климата для бассейна р. Березины на период до 2035 г. получены с использованием материалов, представленных в Атласе глобальных и региональных климатических прогнозов Пятого доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)[6] [18]. Для бассейна р. Березины более подробный прогноз климата с учетом его региональной изменчивости, выявленной по метеорологическим станциям за период с 1961 по 2015 г., разработан по наиболее неблагоприятным (консервативным) сценариям наибольшего повышения температуры и снижения осадков, а также с учетом линейной интерполяции.

По прогнозам наиболее консервативных сценариев изменения климата, повышение температуры в бассейне р. Березины в среднем за год может составить до 1,9 °С при максимальном повышении зимой на 2,3 °С, летом – на 1,9 °С, весной и осенью – примерно на 1,7 °С. При этом годовое количество осадков изменится незначительно (суммарно за год уменьшится на 2 %) с увеличением их зимой (в среднем на 7 %), максимальным уменьшением летом (в среднем на 10 %), в меньшей степени уменьшением весной (на 4 %) и незначительном уменьшении осенью (в среднем на 1,6 %).

По методу гидролого-климатических расчетов [21] получены прогнозные оценки изменения речного стока в бассейне р. Березины на период до 2035 г. При этом использованы результаты оценки фактического изменения климата и речного стока за период 1961–2015 гг. и уточненный прогноз изменения климата на период до 2035 г. в исследуемом бассейне с учетом мультимодального ансамбля из четырех сценариев, рекомендованных МГЭИК, а также региональной изменчивости климата [18, 22]. Обобщение результатов расчетов прогнозного изменения стока в бассейне Березины на период до 2035 г. приведено в табл. 9 [18].

Таблица 9. Прогноз изменения поверхностного стока до 2035 г. для бассейна р. Березины, в % от современного состояния
Table 9. Forecast of changes in surface runoff up to 2035 for the rivers of the Berezina basin, in % of the current state

Гидрологический пост	Зима	Весна	Лето	Осень	Среднегодовой
Борисов	13,7	–0,8	–3,5	–1,1	2,1
Бобруйск	4,3	–18,4	–2,1	–10,8	–6,7

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы о прогнозном изменении стока в бассейне р. Березины до 2035 г. [18]:

– предполагается снижение среднегодового стока на юге бассейна;

– незначительное изменение стока в зимний период по бассейну на юге и увеличение на севере;

6 Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Женева: МГЭИК, 2013. 1552 с. // Материалы МГЭИК. [Электр. ресурс]. Режим доступа: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf (дата обращения: 04.06.2025).

– в весенний период, за редким исключением, вероятно снижение стока;

– в летний период прогнозируется некоторое уменьшение стока;

– в осенний период (особенно в начале осени и до середины октября) также прогнозируется снижение стока.

Исследование и водохозяйственный мониторинг водохранилища «Светлогорское»

Для эффективной эксплуатации водохранилища «Светлогорское» необходимо совершенствовать мониторинг поверхностных вод, для чего следует перейти от эпизодического наблюдения к автоматизированной системе сбора данных.

Предлагается:

– установить гидрометеорологические станции, а также датчики уровня и температуры воды;
– вести учет в реальном времени по фильтрационным потерям и испарению;
– использовать данные спутникового мониторинга для отслеживания площади зеркала водохранилища.
– организовать лабораторные исследования по динамике заиления и коэффициентам фильтрации;
– создать цифровую геоинформационную модель водохранилища (в среде QGIS, ArcGIS и т. п.);
– разработать сценарный анализ эксплуатации водохранилища при экстремальных осадках и длительных засухах, модель изменения сезонной водоотдачи рек Березины и Сведи;
– выполнить анализ потребности водопотребителей по месяцам для сглаживания водозаборов;
– исследовать возможность накапливающей фильтрации для поддержания уровней;
– разработать адаптивные графики управления водоподачей и сбросами;
– провести анализ биоразнообразия в зоне влияния водохранилища, в т. ч. болотных и пойменных экосистем;
– исследовать влияние изменения водного режима на агропромышленный комплекс региона.

Для повышения эффективности мониторинга уровня водопотребления и водопользования предлагается установка измерительного устройства в реперных точках расчетных створов исследуемых рек и водохранилища «Светлогорское»[7].

7 Устройство для измерения уровня воды: пат. 13217. Беларусь, МПК U G 01F 23/00 / А. А. Волчек, М. А. Таратенкова, Д. А. Шпока, Е. И. Дмухайло; заявитель Брест. гос. техн. ун-т. № u 20220312; заявл. 30.12.22; опубл. 30.06.23 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2023. № 3. С. 97–98.

ВЫВОДЫ

Исследование многолетних колебаний стока р. Березины выявило, что весенний период составляет 39 % от общего годового стока, на зимний сток приходится 22 %, на летне-осенний сезон – 39 %. В свою очередь, на р. Сведи весенний сток доминирует, составляя 48 % от годового объема, зимний сток – 20 %, сток летне-осеннего периода – 32 % от общего годового стока.

Анализ изменений стока р. Березины за период с 1986 по 2015 г. по сравнению с периодом 1961–1986 гг. показал, что среднегодовые расходы воды остались практически неизменными. Однако отмечено значительное снижение стока весеннего половодья, составившее от 30 до 40 %, с более ранним достижением пика. В то же время, зимний сток увеличился с 11 до 21 %, тогда как летний сток претерпел незначительные изменения.

На основании многолетних наблюдений за стоком р. Березины экологический сток в створе Светлогорск установлен на уровне 75 % от минимального месячного стока с 95 %-й обеспеченностью и равен 34,7 м^3/с. При применении метода переноса обеспеченностей экологический сток р. Березины с 95 %-й вероятностью превышения, согласно проведенным гидрологическим расчетам, составляет 67,7 м^3/с. Для р. Сведи соответствующие значения экологического стока составили 0,332 м^3/с и 0,706 м^3/с.

По результатам водохозяйственных расчетов в пределах исследуемого участка определен график подачи воды из двух основных источников – рек Березины и Сведи. В качестве оценки допустимых объемов изъятия принята разница стока расчетной обеспеченности (75 %) и величины стока данной обеспеченности, вычисленной методом переноса. Это позволяет наиболее объективно оценить объем забора, оказывающий минимальное воздействие на естественный гидрологический режим реки. Общий объем забора из р. Березины составил 37 720,00 тыс. м^3, из р. Сведи – 3673,71 тыс. м^3. При этом доля снижения стока Березины – около 1 % – находится в пределах допустимых погрешностей. В свою очередь, в период февраль – апрель доля снижения экологического стока р. Сведи составила 20 % при допустимых 75 %.

Таким образом, полный объем водохранилища «Светлогорское» оценивается в 45 119,00 тыс. м^3, мертвый объем – в 21 253,8 тыс. м^3. Средняя глубина при минимальных уровнях составляет 1,72 м, что обеспечивает защиту от зарастания ложа водохранилища, при этом минимальные средние глубины приходятся на зимний и осенний периоды, когда водная растительность имеет минимальную активность. Общие потери воды составили 17 320,27 тыс. м^3, из которых 2204,46 тыс. м^3 – расходы на фильтрацию в оградительный канал.

Поверочный расчет для года 90 %-й обеспеченности показал достаточность полного объема водохранилища для удовлетворения потребностей сельского хозяйства в водных ресурсах, при этом доля забора в стоке р. Березины в расчетном створе возросла до 1,5 %, что также незначительно влияет на эко-

логическое состояние реки. Начало и график наполнения водохранилища в феврале – мае остается в данном случае без изменений, только в июне забор воды возрастает до 9000 тыс. м^3 и при необходимости наполнение осуществляется в июле в объеме 2200 тыс. м^3. Незначительно снижается максимальный объем наполнения – до 44 236,6 тыс. м^3.

Подходы для проведения водохозяйственных расчетов в границах изучаемого участка рек Березины и Сведи и водохранилища «Светлогорское», представленные в этой статье, доказали свою эффективность и могут применяться при решении аналогичных задач в схожих природно-климатических и гидрологических условиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилович И. С., Гледко Ю. А., Тарасевич И. В. Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 61–71. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-61-71
2. Измайлова А. В. Долгосрочные изменения компонентов водного баланса крупных водохранилищ Азии России // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 3. С. 47–58.
3. Данилович И. С. Водный баланс и уровенный режим водоемов Беларуси // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2: Химия. Биология. География. 2005. № 3. С. 110–114.
4. Обухов Е. В. Исследование влияния водности года на внешний водообмен Днепродзержинского водохранилища в условиях изменения климата // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. № 60 (4). С. 380–388.
5. Слейман А., Козлов Д. В. Использование искусственных нейронных сетей для оценки поверхностного стока в расчетах водохозяйственного баланса бассейна реки Верхний Оронтес // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 21–37. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-21-37
6. Коледа К. В. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур: рекомендации / К. В. Коледа и др., под общ. ред. К. В. Коледы, А. А. Дудука. Гродно: ГГАУ, 2010. 340 с.
7. Arthington A. H., Bunn S. E., Poff N. L. & Naiman R. J. (2006). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems // Ecological Applications. No. 16 (4). P. 1311–1318.
8. Dyson M., Berkamp G. and Scanlon J. Editors. 2003. Flow: the essentials of environmental flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
9. Tharme R. E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers // River Research and Applications. 2003. Vol. 19. P. 397–442.
10. Smakhtin V., Revenga C. and Döll. P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity // Water International. 2004. Vol. 29. P. 307–317.

11. Блакітны скарб Беларусі: Рэкі, азёры, вадасховішчы, турысцкі патынцыял водных аб'ектаў / маст.: Ю. А. Тарэеў, У.І. Цярэнцьеў. Мінск: БелЭн, 2007. 480 с.
12. Шведовский П. В., Валуев В. Е., Волчек А. А., Федоров В. Г. Эколого-социальные аспекты освоения водно-земельных ресурсов и технологий управления режимами гидромелиораций. Минск: Ураджай, 1998. 363 с.
13. Логинов В. Ф., Волчек А. А. Водный баланс речных водосборов Беларуси. Минск: Тонпик, 2006. 160 с.
14. Бурлибаев М. Ж., Волчек А. А., Шведовский П. В. Проблемы оптимизации природопользования и природообустройства в математических моделях и методах. Алматы: Изд-во «Каганат», 2003. 532 с.
15. Ясельда И. В. и др. Реки Полесья / под общ. ред. А. А. Волчека, И. И. Кирвеля, Н. В. Михальчука. Национальная академия наук Беларуси, Полесский аграрно-экологический институт. Минск: Беларуская навука, 2017. 416 с.
16. Волчек А. А., Дашкевич Д. Н., Кухаревич М. Ф., Парфомук С. И., Сидак С. В., Шешко Н. Н., Шпендик Н. Н. Оценка допустимого отбора речных вод пойменными рыбхозами Белорусского Полесья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 76 – 99. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99
17. Волчек А. А. Гидрологические расчеты: уч. пособие. М.: КНОРУС, 2021. 418 с.
18. Волчек А. А., Корнеев В. Н., Парфомук С. И., Булак И. А. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / под общ. ред. А. А. Волчек, В. Н. Корнеева. Брест: Альтернатива, 2017. 228 с.
19. Волчек А. А., Парфомук С. И. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока / Веснік Палескага джзяржаўнага універсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. 2009. № 1. С. 22 – 30.
20. Логинов В. Ф., Волчек А. А. Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии // География и природные ресурсы, № 2, 2005. С. 137 – 144.
21. Мезенцев В. С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 3. С. 299 – 301.
22. Волчек А. А., Парфомук С. И. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2007. № 1. С. 50–62.

REFERENCES

1. Danilovich I. S., Gledko Yu. A., Tarasevich I. V. Repeatability of dry periods on the territory of Belarus in connection with atmospheric circulation in Atlantic-European sector. *Meteorology and hydrology*. 2023. № 9. P. 61–71. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-61-71
2. Izmajlova A. V. Long-time changes of the water balance components of the major reservoirs of the Asian part of Russia. *Water resources*. 2023. Vol. 50. № 3. P. 47–58.
3. Danilovich I. S. Water balance and level regime of water bodies of Belarus. *Newsletter of the Belarus State University*. Series 2: Chemistry. Biology. Geography. 2005. № 3. P. 110–114.
4. Obuhov E. V. Studies of annual water content on external water exchange of the Dneprodzerzhinsk Reservoir in the conditions of the climate change. *Power Industry. Proceedings of the CIS higher education institutions and power industry associations*. 2017. No. 60 (4). P. 380–388.
5. Slejman A., Kozlov D. V. Application of artificial neuronets for assessment of the surface flow in calculations of water/economic balance for the Verkhny Oronets River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 21–37. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-21-37

6. Koleda K. V. Modern technologies of agricultural crop cultivation: recommendations / K. V. Koleda et al.; edited by K. V. Koleda, A. A. Duduk. Grodno: GGAU, 2010. 340 p.
7. Arthington A. H., Bunn, S. E., Poff N. L. & Naiman R. J. (2006). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications*. No. 16 (4). P. 1311–1318.
8. Dyson M., Berkamp G. and Scanlon J. Editors. 2003. Flow: the essentials of environmental flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
9. Tharme R. E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*. 2003. Vol. 19. P. 397–442.
10. Smakhtin V., Revenga C. and Döll P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. *Water International*. 2004. Vol. 29. P. 307–317
11. Blakitny skarb Belarusi: Reki, azery, vadaskhovishchy, turystski patyntsyyal vodnykh ab'ektaў / mast.: Yu. A. Tareeў, U. I. Tsyarents'eў. Minsk: BelEn, 2007. 480 p.
12. Shvedovskii P. V., Valuev V. E., Volchek A. A., Fedorov V G. Ecological/social aspects of the water/ground resources development and water conservation regimes management technologies. Minsk: Uradzhai, 1998. 363 p.
13. Loginov V. F., Volchek A. A. The Belarus river catchments water balance. Minsk: Tonpik, 2006–160 p.
14. Burlibaev M. Zh., Volchek A. A., Shvedovskiy P. V. Problems of nature use and nature arrangement optimization in mathematical models and methods. Almaty: «Kaganat» Publishing House, 2003. 532 p.
15. Yasel'da I. V. [et al.] Rivers of Poles'ye / Edited by A. A. Volchek, I. I. Kirvelya, N. V. Mikhal'chuk; National Academy of Sciences of Belarus, Polessk agrarian/ecological institute. Minsk: Belarusian Science, 2017. 416 p.
16. Volchek A. A., Dashkevich D. N., Kukharevich M. F., Parfomuk S. I., Sidak S. V., Sheshko N. N., Shpendik N. N. Assessment of permissible withdrawal of river waters by floodplain fisheries of Belarusian Poles'ye. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. № 1. P. 76 – 99. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99
17. Volchek A. A. Hydrological calculations: Training manual / A. A. Volchek. Moskva: KNORUS, 2021. 418 p.
18. Volchek A. A., Korneev V. N., Parfomuk S. I., Bulak I. A. Water resources of Belarus and the forecast with taking into account the climate changes / Edited by A. A. Volchek, V. N. Korneeva. Brest: Al'ternativa, 2017. 228 p.
19. Volchek A. A., Parfomuk S. I. Application programs package for determination of calculated characteristics of the river flow. *Newsletters of the Polessk University*. Series: Sciences of nature. 2009. № 1. P. 22–30.
20. Loginov V. F., Volchek A. A. Changing of evaporation from water surface on the territory of Belarus. *Geography and water resources*. 2005. № 2. P. 137–144.
21. Mezentsev V. S. The hydrological/climatic hypothesis and examples of its use. *Water resources*. 1995. Vol. 22. № 3. P. 299–301.
22. Volchek A. A., Parfomuk S. I. Assessment of Belarusian Polessye small rivers water regime under the impact of natural anthropogenic factors (the Yaseldsa as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2007. No. 1. P. 50–62.

Сведения об авторах:

Волчек Александр Александрович, д-р геогр. наук, профессор, кафедра природообустройства, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; https://orcid.org/0000-0002-8838-797X; e-mail: volchak@tut.by

Парфомук Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой математики и информатики, факультет электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; https://orcid.org/0000-0002-2134-6241; e-mail: parfom@mail.ru

Сидак Светлана Васильевна, канд. геогр. наук, доцент кафедры математики и информатики, факультет электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; https://orcid.org/0000-0001-7433-2524; e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Шешко Николай Николаевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра природообустройства, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; https://orcid.org/0000-0001-6373-8166; e-mail: optimum@tut.by

Шпендик Наталья Николаевна, канд. геогр. наук, доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 257; e-mail: shpendik@tut.by

About the authors:

Aleksandr A. Volchek, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Chair of Nature Arrangement, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, Brest, Belarus; https://orcid.org/0000-0002-8838-797X; e-mail: volchak@tut.by

Sergey I. Parfomuk, Ph. D, Associate Professor, Head, Chair of Mathematics and Information Science, Department of Electronic Information Systems, Brest State Technical University, Brest, Belarus; https://orcid.org/0000-0002-2134-6241; e-mail: parfom@mail.ru

Svetlana V. Sidak, Ph. D, Associate Professor, Chair of Mathematics and Information Science, Department of Electronic Information Systems, Brest State Technical University, Brest, Belarus; https://orcid.org/0000-0001-7433-2524; e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Nikolay N. Sheshko, Ph. D, Associate Professor, Associate Professor, Chair of Nature Arrangement, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, Brest, Belarus; https://orcid.org/0000-0001-6373-8166; e-mail: optimum@tut.by

Natalia N. Shpendik, Ph. D, Associate Professor, Associate Professor, Chair of Heat/gas Supply and Ventilation, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, Brest, Belarus; e-mail: shpendik@tut.by

Поступила в редакцию / Received 29.09.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 19.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 12.01.2026.

УДК 504.4; 062.2 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-57-74*

Оценка влияния снижения объемов сброса загрязненных сточных вод на качество воды речных бассейнов России

С. Д. Беляев, А. Е. Косолапов, Е. А. Поздина

belyaev@wrm.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В 2025 г. стартовал федеральный проект «Вода России». Одна из целей проекта – снижение сброса загрязненных сточных вод посредством модернизации канализационных очистных сооружений. Важнейшим критерием для отбора проектов модернизации должна быть оценка потенциального улучшения качества воды в водном объекте – приемнике сточных вод. **Методы.** Сопоставительный анализ изменений объемов сброса загрязненных сточных вод и индекса качества поверхностных вод в масштабе речных бассейнов России за период 2012–2024 гг. Аналитические расчеты влияния снижения загрязненности сточных вод на качество воды в водном объекте (приемнике сточных вод) при различных исходных значениях концентраций загрязняющих веществ в сточных водах, различных соотношениях расходов сточных и речных вод. **Результаты.** Проиллюстрированы и сопоставлены изменения сброса загрязненных сточных вод и качества воды для основных речных бассейнов России в 2012–2024 гг. Установлено, что качество воды улучшились только в 37 % из речных бассейнов, в которых достигнуто существенное (на четверть и более) сокращение сброса загрязненных сточных вод. Получена аналитическая зависимость, которая может быть рекомендована для скрининговой оценки проектов строительства и реконструкции очистных сооружений с точки зрения потенциального улучшения качества воды в водном объекте – приемнике сточных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поверхностные водные объекты, качество воды, загрязненные сточные воды, скрининговая оценка проектов очистки сточных вод

Для цитирования: Беляев С. Д., Косолапов А. Е., Поздина Е. А. Оценка влияния снижения объемов сброса загрязненных сточных вод на качество воды речных бассейнов России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 57–74. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-1-57-74; EDN: STTDEW

© Беляев С. Д., Косолапов А. Е., Поздина Е. А., 2026

Assessing the impact of wastewater discharge reducing on water quality in river basins of Russia

Sergey D. Belyaev ✉, **Aleksey E. Kosolapov**, **Elena A. Pozdina**

✉ belyaev@wrm.ru

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

ABSTRACT

Relevance. The federal project "Water of Russia" was launched in 2025. One of its goals is to reduce the discharge of wastewater through the modernization of treatment plants. The most important criterion for selecting modernization projects should be an assessment of the potential improvement in water quality in the receiving water body. **Methods.** Comparative analysis of changes in the wastewater discharge and the surface water quality index at the scale of river basins in Russia for the period 2012–2024. Analytical calculations of the impact of reducing wastewater pollution on water quality in a water body (wastewater receiver) for different initial values of pollutant concentrations in wastewater and different ratios of wastewater and river water flow rates. **Results.** Changes in wastewater discharge and water quality for the main river basins of Russia in 2012–2014 are illustrated and compared. We have stated that water quality became better only in 37% of river basins where considerable (by a quarter or higher) decrease of the wastewater discharge had been achieved. We have obtained an analytical dependence, which can be recommended for screening of the water treatment plant upgrading projects in terms of potential water quality improvement in a water body.

KEYWORDS: surface water bodies, water quality, wastewater, screening of the waste water treatment projects

For citation: Belyaev S. D., Kosolapov A. E., Pozdina E. A. Assessing the impact of wastewater discharge reducing on water quality in river basins of Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 1. P. 57–74. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-1-57-74; EDN: STTDEW

ВВЕДЕНИЕ

В рамках стартовавшего в 2025 г. Федерального проекта (ФП) «Вода России»[1] предусмотрено значительное сокращение сброса в водные объекты загрязненных сточных вод посредством строительства/реконструкции очистных сооружений централизованных систем водоотведения населенных пунктов. Несмотря на то, что качество воды водных объектов не отражено в целевых показателях ФП «Вода России», очевидно, что строительство/реконструкция очистных сооружений осуществляется именно для его улучшения. По этой причине одним из критериев отбора проектов должна быть сопоставительная оценка их потенциального влияния на качество

1 Паспорт федерального проекта «Вода России» национального проекта «Экологическое благополучие». [Электронный ресурс]. URL: https://voda.gov.ru/activities/ekologicheskoe-blagopoluchie/561096/ (дата обращения: 10.12.2025).

воды, на численность населения, экологические условия для которого будут улучшены. Формализованные механизмы такой оценки могли бы существенно упростить работу созданного в рамках ФП «Вода России» Научно-технического совета.

С целью разработки названных механизмов в первой из запланированной серии статей приводится ретроспективный (2012–2024 гг.) анализ влияния сокращения сброса загрязненных сточных вод на качество воды по крупным речным бассейнам России, а также некоторые аналитические оценки потенциального воздействия нормативной очистки сточных вод на качество воды водного объекта, даются общие рекомендации по учету этих факторов при отборе объектов для строительства/реконструкции очистных сооружений в рамках ФП «Вода России».

МЕТОДЫ РАБОТЫ

Снижение годового объема сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты регулярно используется в документах государственного стратегического планирования[2] в качестве одного из целевых показателей. Источником информации по этому показателю являются ежегодные обобщения сведений по форме федерального статистического наблюдения 2-ТП (водхоз), представленные на цифровой платформе «Вода»[3] [1].

Основным инструментом оценки качества воды поверхностных водных объектов является удельный комбинаторный индекс загрязненности воды – УКИЗВ (табл. 1)[4]. Этот показатель ежегодно устанавливается по створам государственной наблюдательной сети. Обобщенная информация по классам-разрядам качества воды по УКИЗВ регулярно публикуется в ежегодниках Росгидромета[5].

В соответствии с действующим приказом Росстата[6], в случае превышения нормативов (технологических либо НДС) хотя бы по одному из нормируемых

2 Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 27.08.2009, № 1235-р. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 11.12.2025). Федеральная целевая программа «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах». Утв. постановлением Правительства РФ от 19.04.2012, № 350. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 11.12.2025). Паспорт федерального проекта Оздоровление Волги. [Электронный ресурс]. URL: https://voda.gov.ru/regulatory/doc-554665/ (дата обращения: 10.12.2025).

3 Государственная информационная система Цифровая платформа «Водные данные» (ГИС ЦП Вода). Сегмент обработки сведений об использовании воды в Российской Федерации 2-ТП (водхоз). [Электронный ресурс]. URL: https://sslgis.favr.ru/2tp (дата обращения: 10.12.2025).

4 РД 52.24.643-2002 Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям // Росгидромет. Ростов- на-Дону, 2002. 50 с.

5 Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник (2012–2024) // Росгидромет. Ростов-на-Дону, (2012–2024). [Электронный ресурс]. URL: https://gidrohim.com/node/44 (дата обращения: 10.12.2025).

6 Приказ Росстата от 02.10.2024 № 445 «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения N 2-ТП (водхоз) «Сведения об использовании воды» и указаний по ее заполнению». [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 10.12.2025).

Таблица 1. Классификация качества воды водотоков по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ)
Table 1. Classification of the watercourses water quality in terms of the value of the water pollution level specific combinatory index (WPLSCI)

Класс и разряд	Характеристика состояния загрязненности воды	УКИЗВ, k
1-й	Условно чистая	1
2-й	Слабо загрязненная	(1, 2]
3-й	Загрязненная	(2–4]
разряд «а»	загрязненная	(2, 3]
разряд «б»	очень загрязненная	(3, 4]
4-й	Грязная	(4–11]
разряд «а»	грязная	(4–6]
разряд «б»	грязная	(6–8]
разряд «в»	очень грязная	(8–10]
разряд «г»	очень грязная	(8–11]
5-й	Экстремально грязная	(11–∞]

Примечание: k – коэффициент запаса[4].

показателей к загрязненным относится весь объем сточных вод, сброшенных водопользователем за отчетный период. Отметим, что до 02.10.2024 весь годовой объем сточных вод считался загрязненным при наличии превышения нормативов хотя бы в один из контрольных периодов (месяц либо квартал, в зависимости от категории объекта). С 2024 г. загрязненным считается только объем, сброшенный за контрольный период, в котором наблюдалось превышение. Эта поправка могла иметь следствием уменьшение объема загрязненных сточных вод в отчетности за 2024 г. при фактическом отсутствии изменений.

Очевидно, что негативное воздействие на водный объект одинаковых объемов сброса загрязненных сточных вод может значительно различаться. К загрязненным сточным водам могут быть отнесены и сточные воды с незначительным превышением содержания одного неопасного компонента (скажем,

взвешенных веществ), и со значительным превышением содержания нескольких токсикантов. Кроме того, это воздействие будет существенно зависеть от соотношения объемов загрязненных сточных вод и стока водного объекта, принимающего сточные воды и пр.

УКИЗВ также небезупречен [2–7]. Значительная часть используемых в нем показателей качества воды характеризуется широкой природной вариативностью. При этом УКИЗВ рассчитывается на основе единых для России значений предельно допустимых концентраций[7], что приводит к неверным трактовкам состояния водного объекта.

Однако поскольку именно эти два показателя – УКИЗВ и объемы загрязненных сточных вод – наиболее широко применяются на практике, было проведено сопоставление их изменений за период с 2012 по 2024 год[8] по речным бассейнам России. Использовались сведения из ГИС ЦП Вода[3] по годовым объемам сброса сточных вод, требующих очистки (в т. ч. загрязненных, сброшенных без очистки; загрязненных, недостаточно очищенных; нормативно очищенных на сооружениях очистки), вычислялась доля нормативно очищенных стоков от общего объема сточных вод, требующих очистки. Для оценки изменения обобщенных показателей качества воды по речным бассейнам проанализированы ежегодные сведения по процентному соотношению числа створов Росгидромета в речном бассейне, результаты наблюдений по которым соответствовали определенным классам-разрядам качества воды по УКИЗВ (таблица 2.1 приложения к ежегоднику 2024 г. и аналогичные ей в ежегодниках других лет[5]).

Понимая все риски и условность обобщений показателей по речным бассейнам, авторы статьи полагают, что с учетом масштабов решаемых в рамках федеральных проектов задач они пригодны для оценки эффективности реализуемых мероприятий.

Для скрининговой оценки проектов строительства/реконструкции очистных сооружений по степени влияния на качество воды водного объекта определена аналитическая зависимость, позволяющая определить для различных соотношений исходных концентраций загрязняющих веществ в сточных водах, объемов загрязненных сточных вод и стока водного объекта, возможно ли ощутимое улучшение качества воды при обеспечении нормативного сброса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

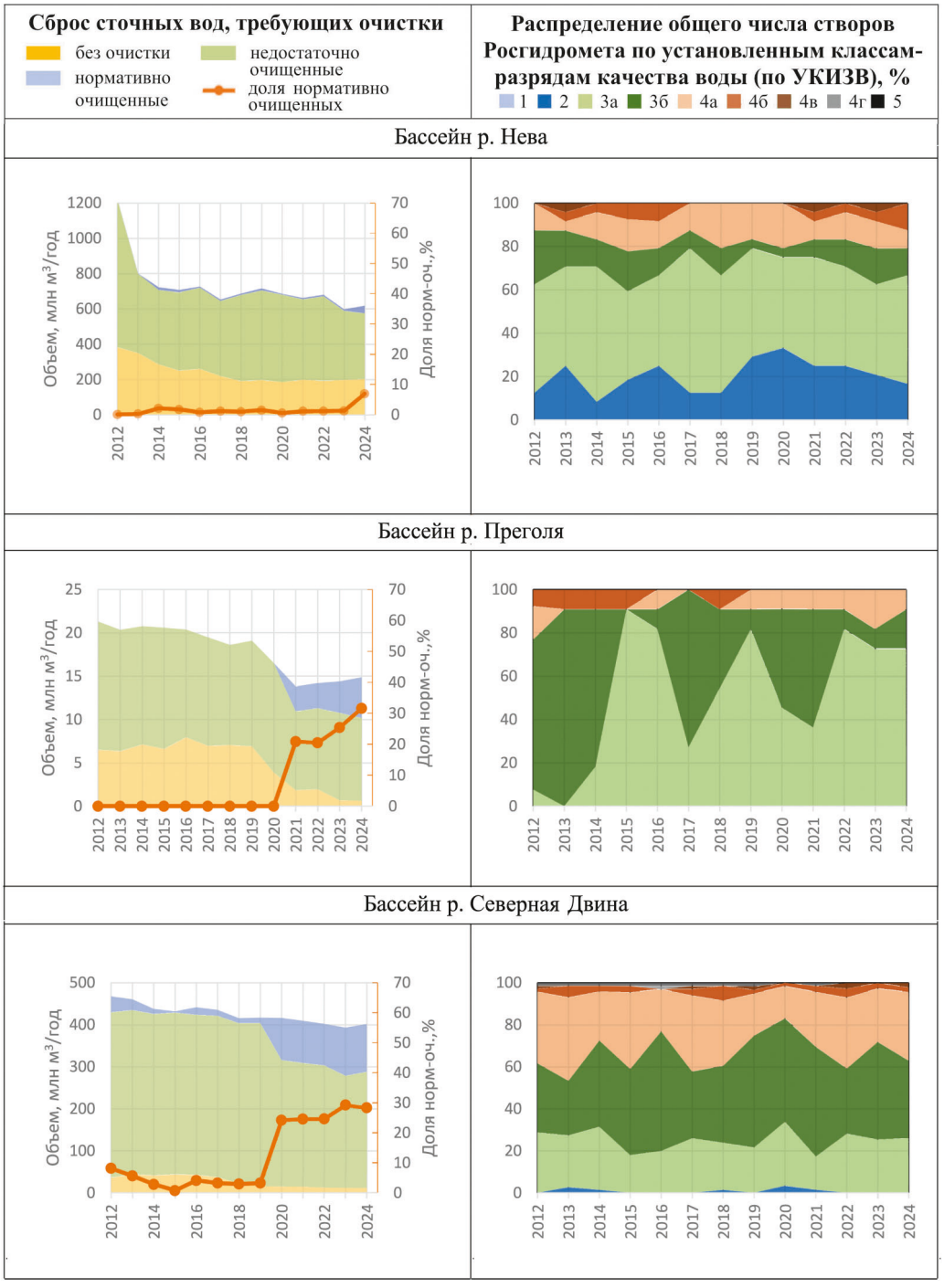
Ниже (табл. 2) сопоставлены изменения показателей сброса сточных вод и качества воды (по УКИЗВ) по 27 «наиболее крупным» речным бассейнам России[9].

7 Утвержденных региональных рыбохозяйственных ПДК к настоящему моменту – единицы.

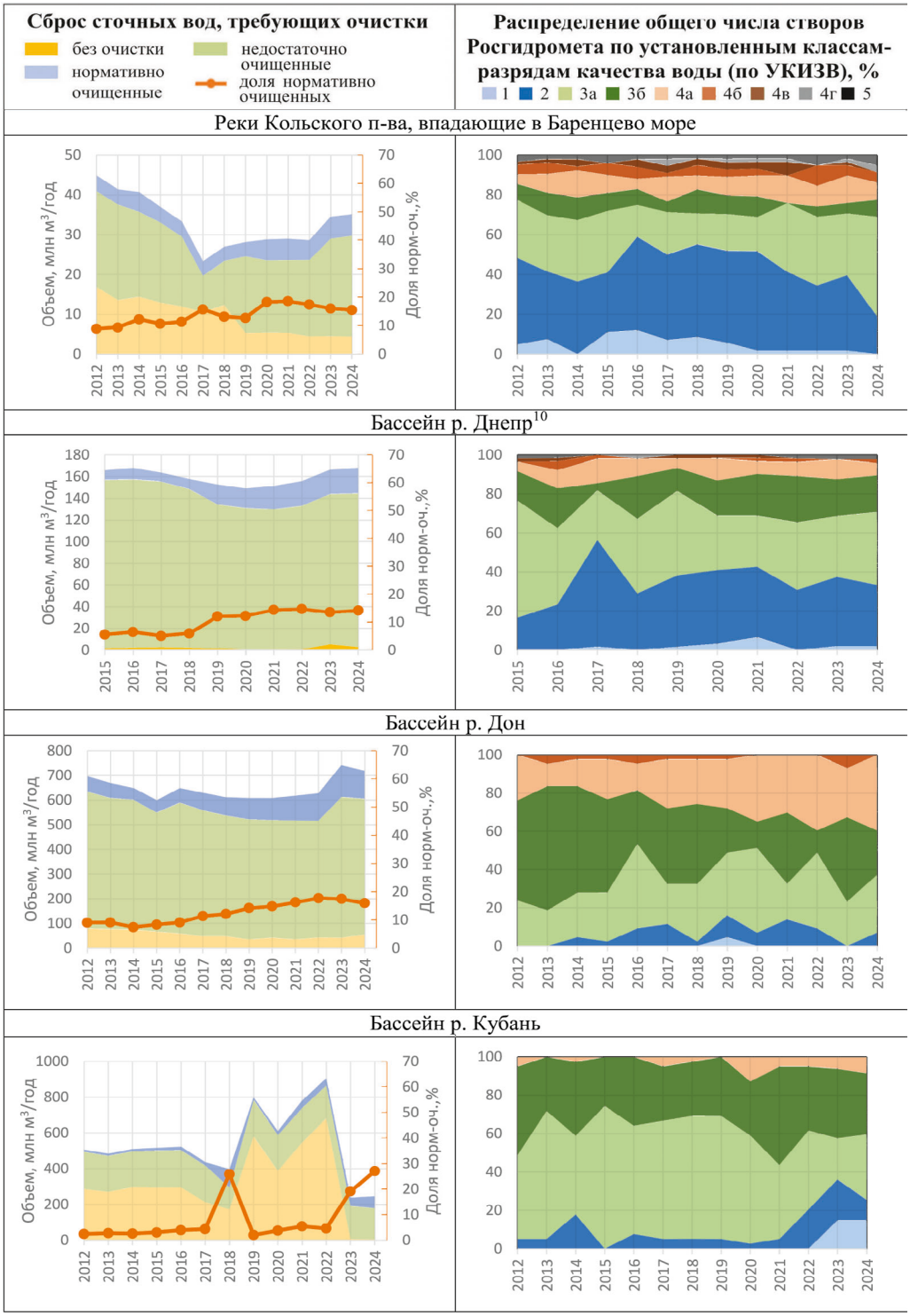
8 Начало периода совпадает с началом реализации ФЦП «Вода России 2012–2020».

9 В кавычки заключена терминология ежегодников Росгидромета. Поскольку читателей могут интересовать сведения по конкретным речным бассейнам, в статье приводятся все полученные нами результаты. Данные по бассейнам с «фрагментарными» наблюдениями не приводятся.

Таблица 2. Показатели сброса сточных вод и качества воды по речным бассейнам России (2012–2024 гг.)
Table 2. Indicators of the wastewater discharge and water quality for river basins of Russia (2012–2024)

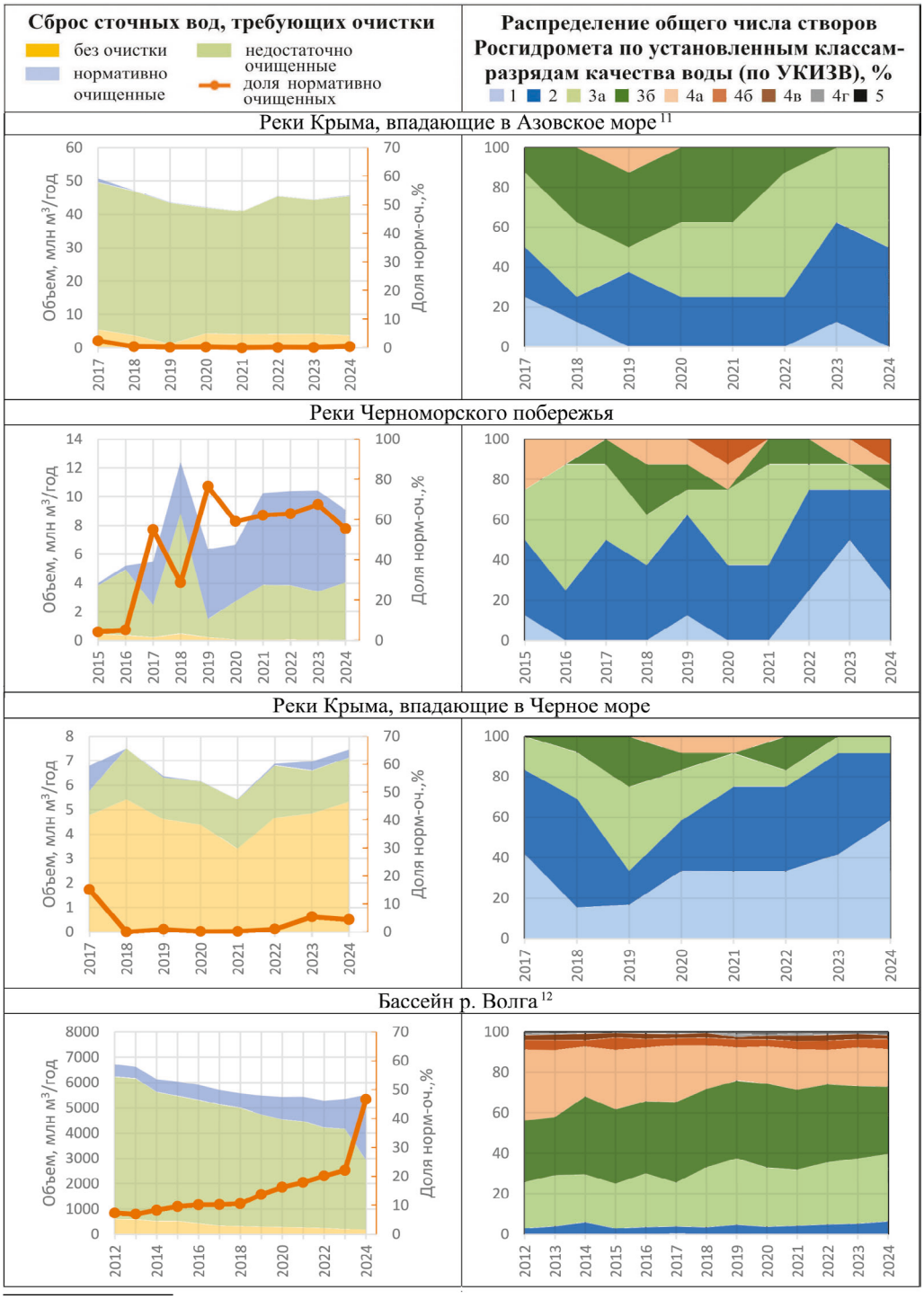


Продолжение таблицы 2



10 Период наблюдения – по наличию информации.

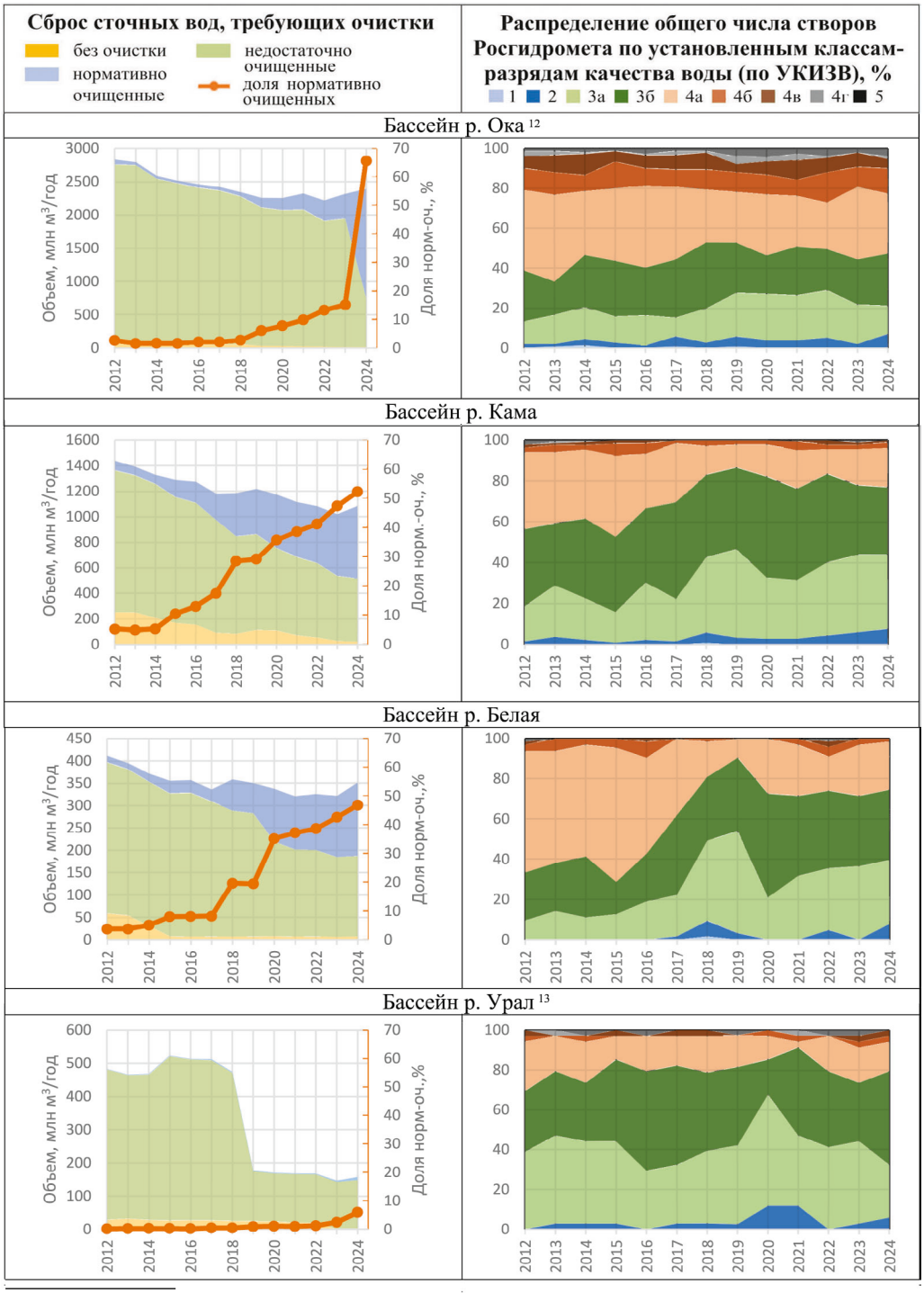
Продолжение таблицы 2



11 Период наблюдения – по наличию информации.

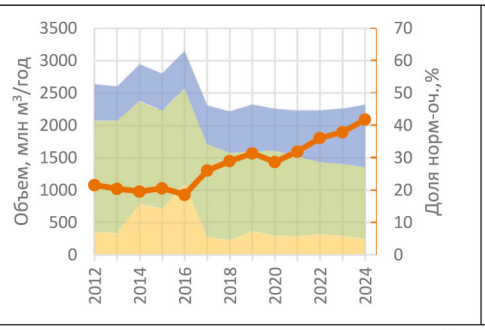
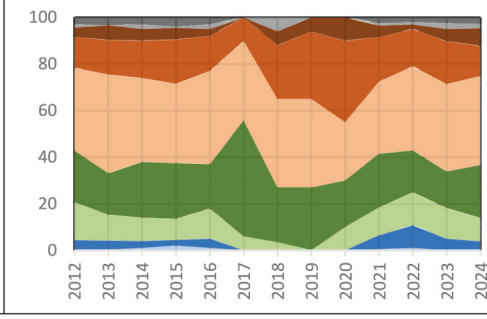
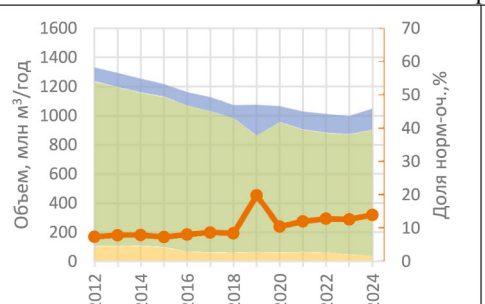
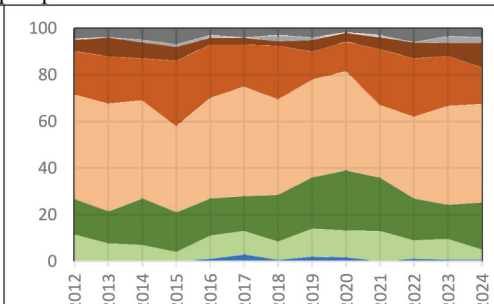
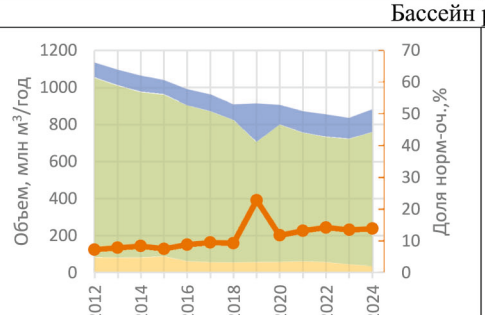
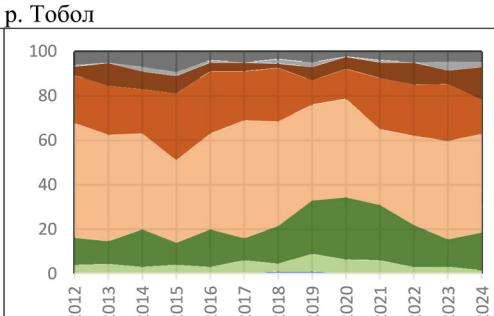
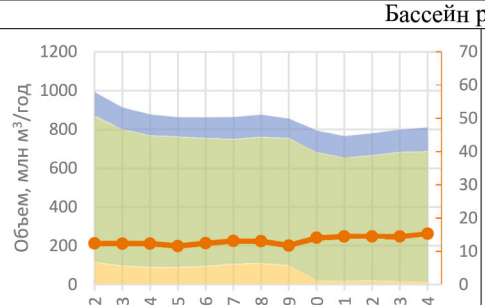
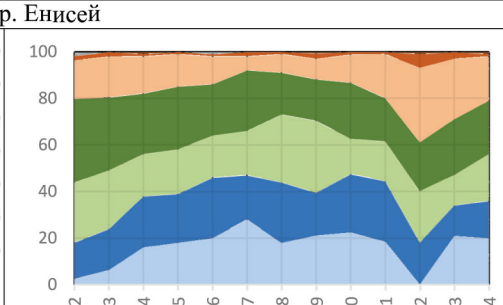
12 Резкое увеличение доли нормативно-очищенных сточных вод в 2024 г. связано в первую очередь с завершением реконструкции очистных сооружений Москвы и в Московской области (подбассейн р. Москвы).

Продолжение таблицы 2

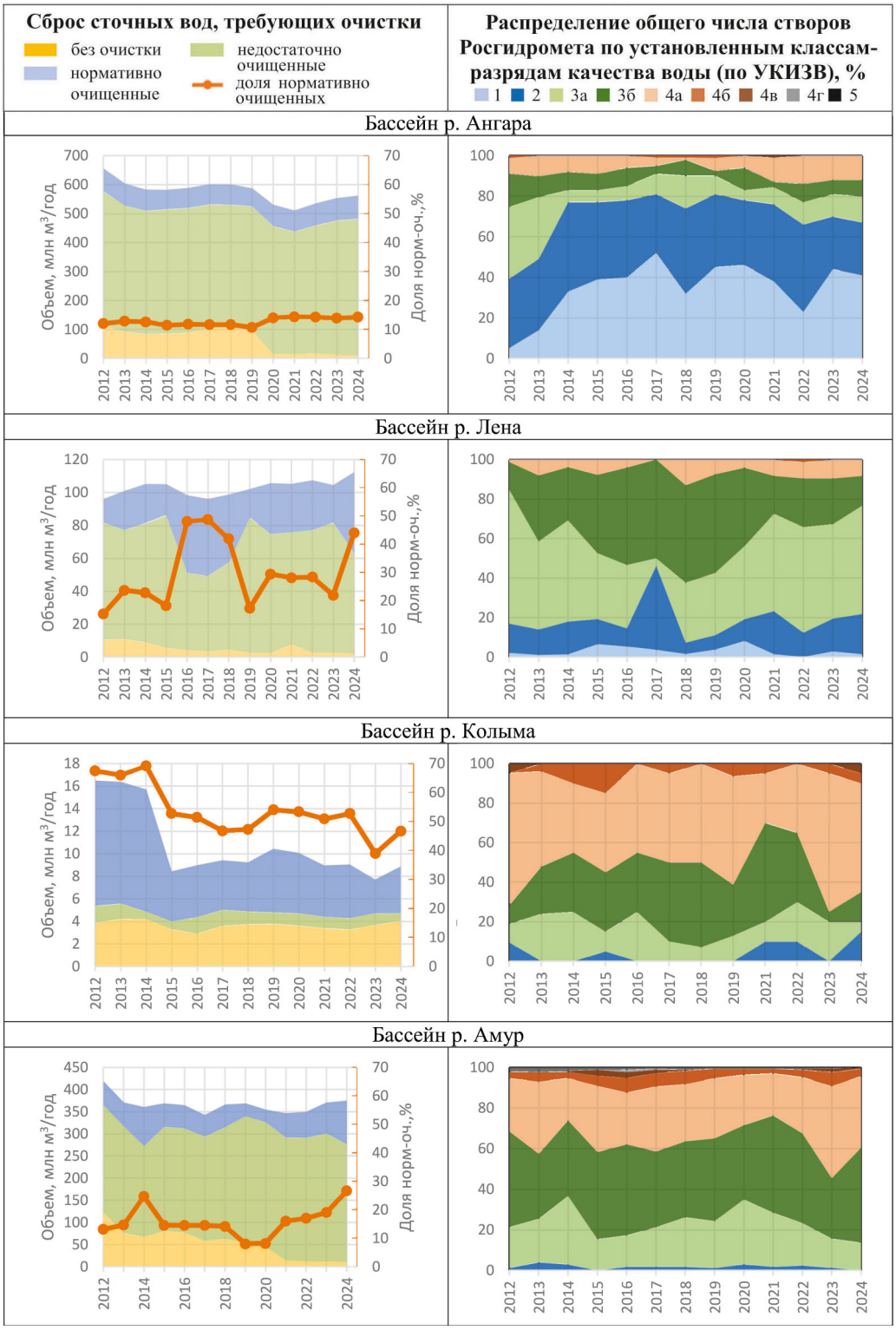


13 Резкое сокращение объема сброса загрязненных сточных вод в 2019 г. связано с переходом Магнитогорского металлургического комбината на замкнутый цикл водоснабжения.

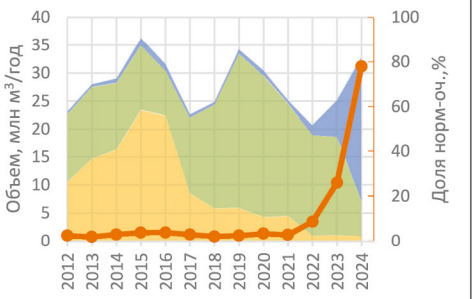
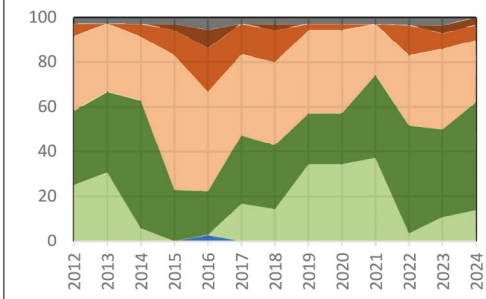
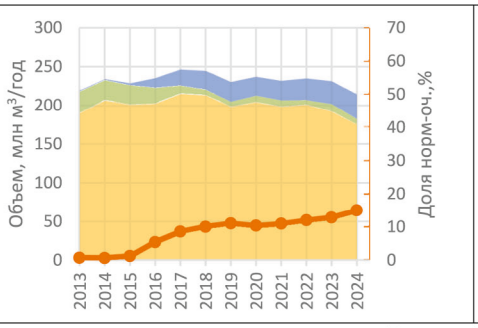
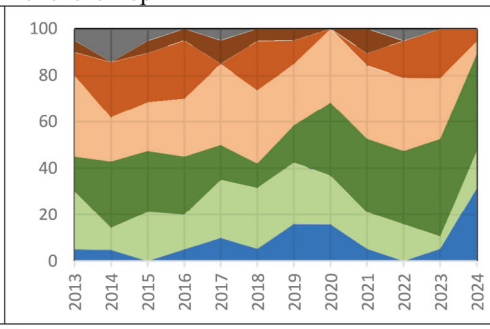
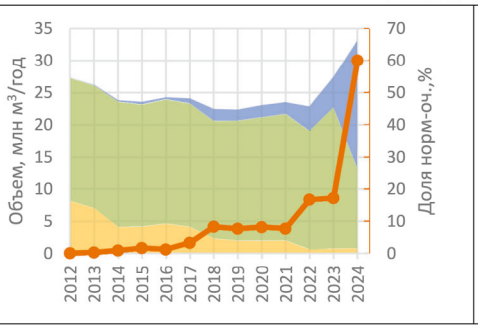
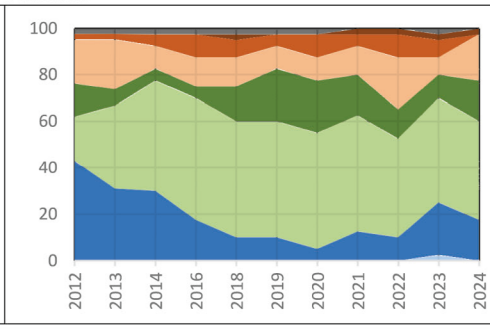
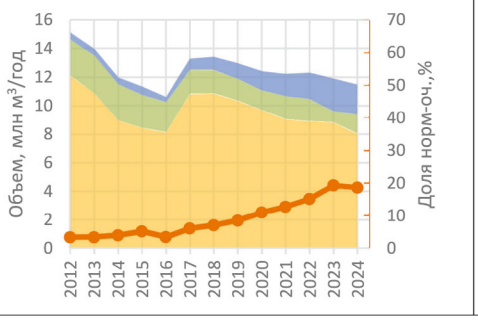
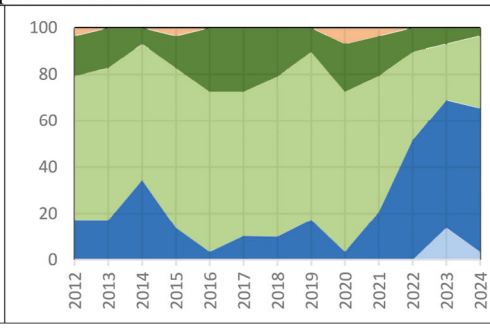
Продолжение таблицы 2

Сброс сточных вод, требующих очистки	Распределение общего числа створов Росгидромета по установленным классам-разрядам качества воды (по УКИЗВ), %
без очистки; недостаточно очищенные; нормативно очищенные; доля нормативно очищенных	1 2 3а 3б 4а 4б 4в 4г 5
Бассейн р. Обь	
	
Бассейн р. Иртыш	
	
Бассейн р. Тобол	
	
Бассейн р. Енисей	
	

Продолжение таблицы 2



Окончание таблицы 2

Сброс сточных вод, требующих очистки	Распределение общего числа створов Росгидромета по установленным классам-разрядам качества воды (по УКИЗВ), %
без очистки; нормативно очищенные; недостаточно очищенные; доля нормативно очищенных	1; 2; 3а; 3б; 4а; 4б; 4в; 4г; 5
Бассейн р. Уссури	
	
Реки бассейна Японского моря[14]	
	
Реки о. Сахалин	
	
Реки полуострова Камчатка	
	

14 Период наблюдения – по наличию информации.

За рассматриваемый период по 25 из 27 бассейнов (93 %) наблюдалось сокращение объемов сброса загрязненных сточных вод при росте доли нормативно-очищенных сточных вод. Как было отмечено выше, часть доли прироста нормативно- очищенных сточных вод в 2024 г. может быть связана с уточнением инструкции по вычислению объема недостаточно очищенных сточных вод. Устойчивые тенденции улучшения качества воды наблюдались только в 10 бассейнах: р. Кубань (увеличилось число створов с 1–2-м классами качества); реки Черноморского побережья (аналогично); р. Волга (увеличилось число створов 1–3-го классов качества); р. Ока (аналогично); р. Кама (аналогично); р. Белая (аналогично); р. Енисей (1–2-й классы качества); р. Ангара (аналогично); реки бассейна Японского моря (1–3-й классы качества при незначительном снижении объема загрязненных сточных вод); реки полуострова Камчатка (1–2 классы качества), реки Крыма, впадающие в Черное море (аналогично, при отсутствии без существенных изменений в объемах загрязненных сточных вод).

При этом из 16 бассейнов, сброс загрязненных сточных вод в которых сократился на четверть и более, в 10 бассейнах (63 % от 16) качество воды не улучшилось: р. Нева; р. Преголя; р. Северная Двина; реки Кольского полуострова, впадающие в Баренцево море; р. Обь; р. Иртыш; р. Тобол; р. Колыма; р. Уссури; реки о. Сахалин.

Очевидно, что реакция на уменьшение сброса загрязненных сточных вод не всегда соответствует ожиданиям. Попробуем разобраться в возможных причинах.

Первая – в рамках бассейнового обобщения локальные улучшения качества воды «теряются». В принятой системе оценок под улучшением понимается повышение класса-разряда качества по УКИЗВ. Если хотя бы по одному наблюдательному створу в бассейне было улучшение, то это отразилось бы на проанализированном нами процентном распределении створов по классам-разрядам качества воды (количество створов в каждом из исследованных бассейнов редко превышало 100, чаще – значительно меньше). Случай, когда ниже выпусков, на которых произошло существенное в масштабах бассейна сокращение сброса загрязненных сточных вод, нет наблюдательных створов, представляется достаточно экзотичным, поскольку створы Росгидромета чаще всего приурочены к местам активного антропогенного воздействия. Таким образом, влияние рассматриваемого фактора незначительно.

Вторая причина – расходы сточных вод значительно меньше расходов реки.

Рассмотрим типичную ситуацию. Допустим, что расход воды в створе реки непосредственно выше выпуска сточных вод составляет Q, а концентрация некоторого загрязняющего вещества $C_р$ превышает ПДК. Для простоты будем представлять концентрации загрязняющих веществ кратно ПДК с точностью до целых (в рамках действующей системы фигурируют оценки, кратные ПДК,

таким образом, «с точностью до целых» – вполне оправданный подход). Тогда концентрацию можно представить в виде: $C_{\text{р}} = \alpha$ где $\alpha \geq 2$ – целое число (это означает, что фактическое значение концентрации – не менее 1,5 ПДК).

Концентрацию рассматриваемого загрязняющего вещества в сточных водах представим аналогично: $C_{\text{с}}^1 = \gamma, \gamma \geq 2$.

Пусть сточная вода в выпуске имеет расход q. Представим его в долях от расхода водного объекта: $q = \beta \times Q$. В соответствии с действующим законодательством сточная вода будет признана загрязненной, а норматив допустимого сброса (НДС) будет установлен из условия равенства значения концентрации загрязняющего вещества в сточных водах[15] значению ПДК.

Пусть в результате водоохранных мероприятий НДС достигнут, и концентрация загрязняющего вещества в сточной воде стала $C_{\text{с}}^2 = 1$ (т. е. равна ПДК).

Концентрация загрязняющего вещества (кратно ПДК) в реке ниже выпуска до проведения водоохранных мероприятий может быть представлена в виде:

$$C_{\text{р}}^1 = \frac{\alpha Q + \gamma q}{Q + \beta Q} = \frac{\alpha + \gamma\beta}{1 + \beta}, \quad (1)$$

а после проведения:

$$C_{\text{р}}^2 = \frac{\alpha + \beta}{1 + \beta}. \quad (2)$$

Оценим, при каких условиях концентрация загрязняющего вещества в реке ниже выпуска уменьшится после проведения названных мероприятий на 0,5 ПДК и более (т. е. приведет к заметному в рамках принятой нами точности снижению концентрации загрязняющих веществ в реке):

$$C_{\text{р}}^1 - C_{\text{р}}^2 \geq 0{,}5 . \quad (3)$$

После элементарных подстановок и преобразований получаем, что условие (3) будет выполняться при:

$$\gamma \geq \frac{1}{2\beta} + 1{,}5 . \quad (4)$$

График (рисунок), построенный на основе формулы (4), дает наглядное представление об ограниченности возможностей воздействия очистки сточных вод на качество воды в реке.

При значениях концентраций некоторого загрязняющего вещества в сточных водах, отношения расхода сточных вод к расходу реки (приемника сточных вод), лежащих ниже линии графика, доведение концентрации загрязняющего вещества в стоках до ПДК (в результате строительства/реконструкции очистных сооружений) не приведет к заметному улучшению качества воды в реке ниже выпуска (снижению концентрации на 0,5 ПДК и более).

15 Для простоты не рассматриваем случай наличия Комплексного экологического разрешения. Поскольку технологические нормативы обычно выше ПДК, полученные зависимости будут тем более справедливы и в этом случае.

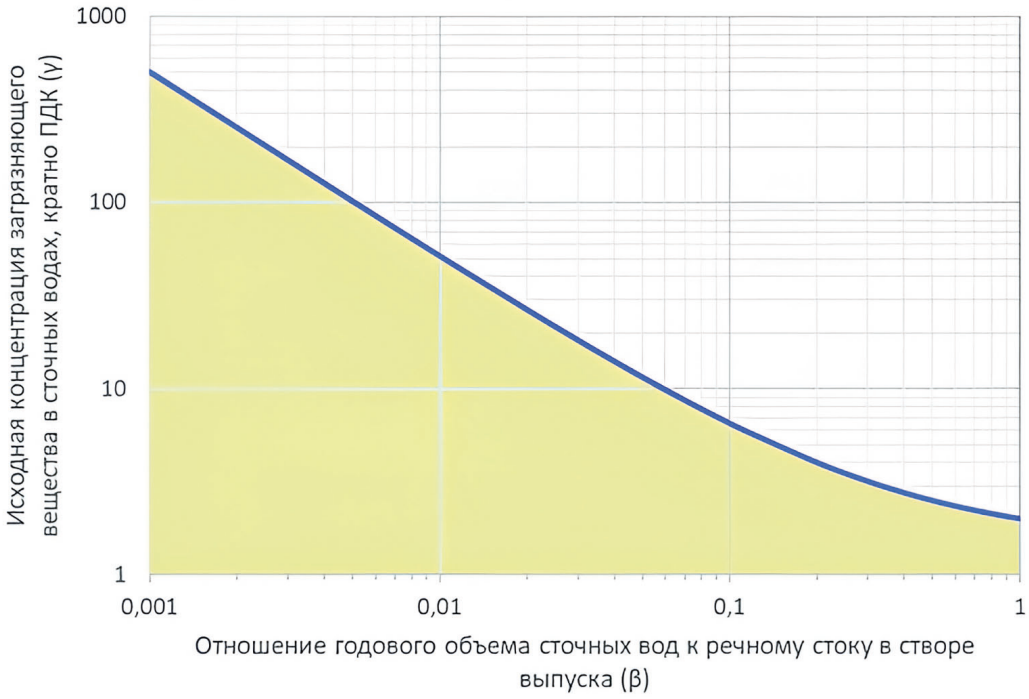


Рисунок. Область значений характеристик сброса сточных вод и речного стока, в пределах которой дополнительная очистка не приведет к заметному улучшению качества воды в реке

Figure. The range of values of wastewater discharge and river flow characteristics within which additional treatment will not lead to a noticeable improvement in the quality of river water

В частности, если расход сточных вод в 100 раз меньше расхода воды в реке (β = 0,01), то заметное улучшение качества речной воды (ниже выпуска, в зоне полного смешения) при доведении сброса до нормативов может быть достигнуто только в случае, когда исходная концентрация контролируемого вещества в стоке составляет 50 ПДК и более (см. рисунок).

Проиллюстрируем сказанное на примере данных Нижегородского водоканала.[16] Среднемноголетний сток р. Волги (в которую осуществляется сброс) в створе Нижнего Новгорода составляет 93 662 млн м^3/год. Объем сброса сточных вод (загрязненные, недостаточно очищенные) – около 250 млн м^3/год, что составляет менее 0,003 от стока реки (в год 95 %-й обеспеченности – немногим более 0,003). Из приведенного графика (рисунок) следует, что для ощутимого улучшения качества воды в р. Волге в результате очистки стоков водоканала до

16 Официальный сайт Нижегородского водоканала. [Электронный ресурс]. URL: https://www.vodokanal-nn.ru/company/vodokanal-v-tsifrakh (дата обращения: 23.12.2025).

17 Схема водоснабжения и водоотведения города Нижнего Новгорода на преспективу до 2025 г. Нижний Новгород, 2015. 482 с. [Электронный ресурс]. URL: https://нижнийновгород.рф/Gorod/Napravleni-yaraboty/Gradostroitelstvo/Utverzhdennaya-shema-vodosnabzheniya (дата обращения: 23.12.2025).

норматива изначальная концентрация загрязняющих веществ в сточных водах должна превышать 100 ПДК! Заметим, что еще в 2014 г. концентрация, например, аммоний-иона в сточных водах Нижегородского водоканала не превышала 30 $ПДК_{рх}$[17]. Таким образом, ожидать существенного улучшения среднегодового качества воды в Волге после модернизации очистных сооружений одного из крупнейших городов России не приходится.

Этого не скажешь, например, о другом мегаполисе – Екатеринбурге. Город стоит практически на водоразделе. Основной объем водоснабжения обеспечивает р. Чусовая (Камский бассейн), а отведение основного объема сточных вод производится в р. Исеть (Иртышский бассейн), недалеко от ее истока. В маловодном 2024 г. сток Исети в черте с. Колюткино (на 19 км ниже выпуска, здесь находится гидропост) составил[18] 206,6 млн $м^3$, а объем загрязненных сточных вод, сброшенных водоканалом[19] – 126,42 млн $м^3$, или 0,61 от стока (очевидно, что в створе выпуска – больше 0,61). Из этого следует (рисунок), что заметное улучшение качества воды при доведении сброса загрязняющих веществ до нормативного можно ожидать при их исходном содержании на уровне менее 2 ПДК (в средний по водности год – около 380 млн $м^3$ – на уровне 2 ПДК). Фактические концентрации в сточных водах г. Екатеринбурга по большей части нормируемых загрязняющих веществ – значительно выше.

Рассмотренные города (и их агломерации) сопоставимы по числу проживающих, промышленному и сельскохозяйственному потенциалу. Однако эффективность капитальных вложений в реконструкцию очистных сооружений, с точки зрения улучшения качества воды в водных объектах (и, как следствие, увеличения числа жителей, для которых будут улучшены экологические условия), очевидно, будет выше в Екатеринбурге.

ВЫВОДЫ

Как показал анализ данных по речным бассейнам России за период с 2012 по 2024 год, связь между применяемым в федеральных программах по улучшению состояния водных объектов целевым параметром – сокращение объемов сброса загрязненных сточных вод – и улучшением качества воды (по УКИЗВ) не слишком убедительна. По большинству (почти двум третям) речных бассейнов со значительным (на четверть и более) снижением объемов сброса загрязненных сточных вод не наблюдается улучшения качества воды. Одна из причин – невозможность ощутимо повлиять на качество воды в водном объекте в силу объективного соотношения показателей качества и объемов сточных вод с объемами стока водного объекта, в который они сбрасываются.

Безусловно, качество сточных вод необходимо улучшать везде, где это возможно. Однако учет потенциального влияния этого улучшения на каче-

18 Данные Ежегодника Росгидромета за 2024 г.
19 По данным ГИС ЦП Вода.

ство воды водных объектов позволит более рационально использовать бюджетные средства, в т. ч. в рамках ФП «Вода России». Скрининговая оценка на основе предложенной в статье аналитической зависимости конкурирующих проектов строительства/реконструкции очистных сооружений, отличающихся по месту реализации, дает возможность выбрать наиболее эффективные из них.

Дальнейшее уточнение оценок предлагаем проводить на основе сопоставления расчетных масс контролируемых загрязняющих веществ в сточных водах и водном объекте – приемнике сточных вод выше выпуска, целевых показателей качества воды, а также с учетом численности населения, для которого будут улучшены экологические условия. Обоснование и примеры применения такого подхода будут проанализированы в следующей публикации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калиманов Т. А., Косолапов А. Е. Цифровая трансформация Росводресурсов: вчера, сегодня, завтра // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг: сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ростов-на-Дону, 20–22 сентября 2023 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2023. С. 276–281. EDN: QGUNCA
2. Беляев С. Д. Водная стратегия 2020: цели и результаты // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 1. С. 5–24. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_1_1
3. Беляев С. Д., Косолапов А. Е., Шаликовский А. В. Государственная водная стратегия: основные принципы построения и механизмы реализации // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг: сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ростов-на-Дону, 20–22 сентября 2023 г. Новочеркасск: ООО «Лик», 2023. С. 233–238. EDN: SLCJTQ
4. Шашуловская Е. А., Мосияш С. А., Шашуловская О. В. и др. К вопросу оценки экологического состояния водотоков в условиях антропогенного пресса // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 2. С. 106–120. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-2-8; EDN: JLHDJZ
5. Попов А. Н. О неопределенности результатов применения величин ПДК при оценке состояния водного объекта // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 4. С. 103–126. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_4_7; EDN: UBHEBN
6. Поздина Е .А., Носаль А. П. Установление региональных целевых показателей качества воды (на примере бассейна р. Чусовой) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2003. Т. 5. № 3. С. 245–263.
7. Валиев В. С., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р., Шамаев Д. Е. Коррекция удельных комбинаторных индексов загрязненности вод с учетом фоновой составляющей // Российский журнал прикладной экологии. 2023. № 1 (33). С. 16–20. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.16.20; EDN: JFGMWG

REFERENCES

1. Kalimanov T. A., Kosolapov A. E. Digital transformation of Rosvodresursy: yesterday, today, and tomorrow / Water resources in the conditions of global chellenges: environmental problems, management, and monitoring: proceedings of All-Russian scientific/practical conference with international participment. Rostov-on-Don, September 20–22, 2023. Novocherkassk: OOO "Lik", 2023. P. 276–281. EDN: QGUNCA
2. Belyaev S.D. Water Strategy 2020: objectives and results. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022. № 1. С. 5–24. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_1_1
3. Belyaev S. D., Kosolapov A. E., Shalikovskiy A. V. State Water Strategy: main principles of the structure and implementation mechanisms / Water resources in the conditions of global chellenges: environmental problems, management, and monitoring: proceedings of All-Russian scientific/practical conference with international participment. Rostov-on-Don, September 20–22, 2023. Novocherkassk: OOO "Lik", 2023. P. 233–238. EDN: SLCJTQ
4. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A., Shashulovskaya O. V., *et al*. On the issue of the watercourses environmental status assessment in the conditions of anthropogenic pressing. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 2. P. 106–120. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-2-8; EDN: JLHDJZ
5. Popov A. N. On uncertainity of results of the mPC values application in assessment of a water body status. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022. No. 4. P. 103–126. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_4_7; EDN: UBHEBN
6. Pozdina E. A., Nosal A. P. Setting of reginal objectives of water quality (bassin of Chusovaya River as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2003. Vol. 5, № 3. P. 245–263.
7. Valiev V. S., Ivanov D. V., Khasanov R. R., Shamoyev D. E. Correction of water pollution specific combinatoric indecies with taing into account a bakground component. *Russian journal of applied ecology*. 2023. No. 1 (33). P. 16–20. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.16.20; EDN: JFGMWG

Сведения об авторах:

Беляев Сергей Дагобертович, д-р геогр. наук, заместитель директора по научной работе, Уральский филиал, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; https://orcid.org/0000-0002-2277-4694; e-mail: belyaev@wrm.ru

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

Поздина Елена Александровна, канд. техн. наук, директор, Уральский филиал, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: nov16dec@mail.ru

About the authors:

Sergey D. Belyaev, Doctor of Geographical Sciences, Director for Academic Activities of Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Ural Branch;

ul. Mira, 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; https://orcid.org/0000-0002-2277-4694; e-mail: belyaev@wrm.ru

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

Elena A. Pozdina, Candidate of Technical Sciences, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Ural Branch; ul. Mira, 23, Ekaterinburg, 620049, Russia; e-mail: nov16dec@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 14.01.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 29.01.2026.
Принята к публикации / Accepted 03.02.2026.

УДК 504.455; 547.211 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-76-93*

Оригинальная статья/Original paper

Эмиссия метана в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища: исследование методом плавучих камер

О. В. Никитин[2], Н. Ю. Степанова[1], Л. В. Новикова[1], А. С. Гордеев[1], Р С. Кузьмин[2], В. З. Латыпова[1]

olnova@mail. ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия
ООО «Экоаудит», г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Пресноводные экосистемы, в т. ч. водохранилища, вносят существенный вклад в глобальные выбросы парникового газа – метана (CH_4). Мелководные зоны водохранилищ считаются «горячими точками» эмиссии, однако их вклад в углеродный бюджет крупных водоемов, таких как Куйбышевское водохранилище, количественно оценен недостаточно. **Методы.** Проведена количественная оценка удельных потоков CH_4 в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища в летне-осенний период 2024 г. методом плавучих камер. Концентрация CH_4 в пробах определялась на газовом хроматографе NEXIS GC-2030. Измерения проводились на двух станциях с контрастными условиями – открытом мелководье и полузамкнутой протоке с замедленным водообменом. Параллельно регистрировались гидрофизические и гидрохимические параметры, а также отбирались пробы донных отложений для анализа гранулометрического состава и содержания органического вещества. **Результаты.** Выявлена высокая пространственная вариабельность потоков CH_4. Средняя эмиссия на станции открытого мелководья составила 22,9 ± 3,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$, в полузамкнутой протоке на порядок выше – 231,8 ± 50,3 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$. Максимальные значения (до 623,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) зафиксированы в июле и связаны с пузырьковым механизмом эмиссии на фоне придонной гипоксии (< 0,5 мг $O_2 \cdot дм^{-3}$). Установлено, что мелководные изолированные заливы, несмотря на малую площадь, вносят непропорционально большой вклад в общие выбросы CH_4 с акватории водохранилища. Данное явление обусловлено комплексом факторов: специфической морфометрией, способствующей термической и кислородной стратификации, а также аккумуляцией илистых осадков, обогащенных органическим веществом. Для точной оценки углеродного следа крупных водохранилищ необходим целенаправленный мониторинг подобных «горячих точек», что следует учитывать при разработке региональных и национальных углеродных бюджетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: климатически активные газы, эмиссия, метан, CH_4, Куйбышевское водохранилище, плавучие камеры, мелководная зона, пузырьковый транспорт, диффузионный поток, углеродный цикл, горячие точки эмиссии

Финансирование: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Для цитирования: Никитин О. В., Степанова Н. Ю., Новикова Л. В., Гордеев А. С., Кузьмин Р. С., Латыпова В. З. Эмиссия метана в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища: исследование методом плавучих камер // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 76–93. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-76-93; EDN: CCLWGS

© Никитин О. В., Степанова Н. Ю., Новикова Л. В., Гордеев А. С., Кузьмин Р. С., Латыпова В. З., 2026

Methane emissions from the shallow water zone of the Kuibyshev reservoir: a floating chamber study

Oleg V. Nikitin[2], Nadezhda Y. Stepanova[1], Lyudmila V. Novikova[1], Aleksander S. Gordeev[1], Ruslan S. Kuzmin[2], Venera Z. Latypova[1]

olnova@mail.ru

Kazan Federal University, Kazan, Russia
Ekoaudit LLC, Kazan

ABSTRACT

Relevance. Freshwater ecosystems, including reservoirs, contribute significantly to global emissions of the greenhouse gas methane (CH_4). The shallow zones of reservoirs are considered emission hotspots; however, their contribution to the carbon budget of large water bodies, such as the Kuibyshev Reservoir, has not been sufficiently quantified. **Methods.** A quantitative assessment of specific CH_4 fluxes in the shallow zone of the Kuibyshev Reservoir was conducted during the summer-autumn period of 2024 using the floating chamber method. CH_4 concentration in the samples was determined by gas chromatography (Nexis GC-2030). Measurements were taken at two contrasting stations: an open shallow area (1) and a semi-enclosed channel with slow water exchange (2). Simultaneously, physical and chemical water parameters were recorded, and bottom sediment samples were collected for granulometric analysis and organic matter content determination. **Results.** High spatial variability of CH_4 fluxes was revealed. The average emission at the open shallow station was 22.9 ± 3.5 mg $CH_4 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$, while in the semi-enclosed channel, it was an order of magnitude higher: 231.8 ± 50.3 mg $CH_4 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$. The maximum values (up to 623.5 mg $CH_4 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$) were recorded in July at Station 2 and were associated with the ebullitive flux mechanism against the background of bottom hypoxia (< 0.5 mg $O_2 \cdot dm^{-3}$). Despite their small area, shallow isolated bays contribute disproportionately to the total CH_4 emissions from the reservoir's water surface. This phenomenon is determined by a combination of factors: specific morphometry that promotes thermal and oxygen stratification, and the accumulation of silty sediments enriched with organic matter. Accurate assessment of the carbon footprint of large reservoirs requires targeted monitoring of such hotspots, which should be taken into account when developing regional and national carbon budgets.

KEYWORDS: greenhouse gases, emissions, methane, CH_4, Kuibyshev Reservoir, floating chambers, shallow zone, ebullition, diffusive flux, carbon cycle, emission hotspots

Financing: The work was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities (No. FZSM-2024-0004).

For citation: Nikitin O. V., Stepanova N. Y., Novikova L. V., Gordeev A. S., Kuzmin R. S., Latypova V. Z. Methane emissions from the shallow water zone of the Kuibyshev reservoir: a floating chamber study. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 1. P. 76–93. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-76-93; EDN: CCLWGS

ВВЕДЕНИЕ

Значительный и все еще уточняемый вклад в глобальную эмиссию метана (CH_4) вносят пресноводные экосистемы [1]. Согласно современным оценкам, их выбросы могут превосходить прямые антропогенные источники, связанные с сельским хозяйством или энергетикой [2]. Особое место среди пресноводных систем занимают водохранилища – искусственные водоемы, созданные путем

зарегулирования рек. Они являются активными центрами трансформации органического вещества, где процессы анаэробного разложения в донных отложениях приводят к образованию CH_4 [3, 4]. Последние данные показывают, что на долю озер и водохранилищ приходится около 10 % глобальных выбросов CH_4 с потенциалом увеличения к концу века на 24–91 % в зависимости от сценария изменения климата [5], при этом потенциал метаногенеза в донных отложениях водохранилищ может многократно превосходить таковой в озерах и реках [6].

Эмиссия CH_4 из водохранилищ в атмосферу происходит по нескольким основным путям: это диффузионный и пузырьковый потоки, дегазация через турбины и водосбросы плотины ГЭС, а также эмиссия, опосредованная водными растениями [7]. В мелководных зонах, характеризующихся интенсивным прогревом и поступлением органического вещества, доминирующим механизмом часто является пузырьковый поток, что приводит к значительной пространственно-временной вариабельности потоков [8]. В то время как мировой опыт исследований эмиссии CH_4 из водохранилищ весьма обширен, для России, обладающей их значительным количеством, данные о потоках CH_4 в водохранилищах остаются фрагментарными [9] и недостаточными для построения точных региональных и национальных оценок [10].

Куйбышевское водохранилище – крупнейшее в каскаде и одно из крупнейших в мире – представляет собой значительный потенциальный источник парниковых газов в регионе [11], особенно в свете наблюдаемых климатических изменений в его бассейне [12]. Несмотря на появление первых обобщающих работ по эмиссии CH_4 в волжских водохранилищах [13], количественные оценки, специфичные для мелководных зон Куйбышевского водохранилища и основанные на прямых измерениях, по-прежнему немногочисленны. Высокая пространственно-временная изменчивость потоков, характерная для этих участков, требует организации более частых наблюдений для сбора репрезентативной статистики. Исследования, проводимые в рамках карбонового полигона «Карбон – Поволжье», нацелены на восполнение этого пробела [14].

Целью представленного в данной статье исследования стала количественная оценка удельных потоков CH_4 с акватории мелководной зоны Куйбышевского водохранилища методом плавучих камер. Задачи работы включали оценку пространственной и временной динамики потоков CH_4 на двух станциях, оценку влияния гидрофизических и гидрохимических параметров (температура, содержание растворенного кислорода) и выявление возможных механизмов эмиссии CH_4 (диффузия и пузырьковый поток).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Куйбышевское водохранилище расположено в Среднем Поволжье и Нижнем Прикамье европейской части России (рис. 1), создано в 1955–1957 гг. в результате строительства плотины Жигулевской ГЭС на р. Волге. Водохрани-

лище имеет сложную конфигурацию, занимает площадь 5900 км^2 при полном объеме 57,3 км^3 и характеризуется сезонным регулированием стока. Для водоема характерна высокая динамичность мелководной зоны [15].

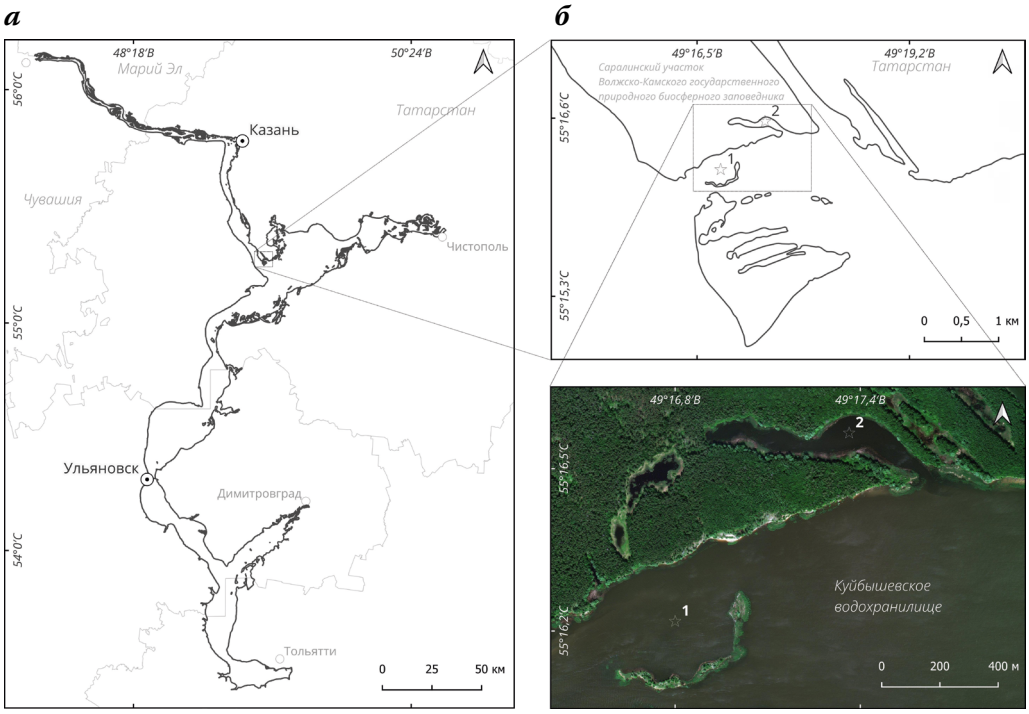


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдения в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища: *а* – обзорная карта региона; *б* – акватория водного участка полигона «Карбон – Поволжье»; цифрами отмечены станции: 1 – открытое мелководье, 2 – полузамкнутая протока

Fig. 1. Location of the sampling sites in the shallow-water zone of the Kuibyshev Reservoir: left panel – overview map of the region; right panel – water area of the Volga Carbon Polygon. Numbers indicate stations: 1 – open shallow water, 2 – semi-enclosed channel

Исследования проводили в период с июня по сентябрь 2024 г. на двух станциях в пределах акватории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» (рис. 1). Станция 1 (55°16′12″ с.ш., 49°16′52″ в.д.) расположена на открытом мелководье (глубины 2–4 м), подверженном ветровому и волновому воздействию. Станция 2 (55°16′34″ с.ш., 49°17′21″ в.д.) находится в полузамкнутой протоке с глубинами 1–4 м, берега которой полностью покрыты высшей водной растительностью.

Для характеристики донных отложений отбирали пробы поверхностного слоя с помощью штангового дночерпателя Заболоцкого, а с глубоководных участков – коробчатым дночерпателем ДАК-250. Гранулометрический состав определяли с помощью анализатора частиц Bluwave (Microtrac, США). Содержание органического вещества устанавливали по величине потерь при прокаливании (ППП, %). Всего за период исследований отобрано 46 проб: 12 – на станции 1, 34 – на станции 2.

Удельные потоки CH_4 определяли камерным методом [16, 17]. Ежемесячно на каждой станции использовали от 3 до 10 камер, равномерно распределенных по акватории. Измерения выполняли с лодки в светлое время суток (с 10:00 до 15:00 по местному времени, UTC+3). Использовали плавучие камеры из пластика объемом 0,008 м^3, изолирующие площадь водной поверхности 0,075 м^2 (рис. 2). Плавучесть и остойчивость обеспечивались поплавком из вспененного полиэтилена по периметру камеры, при установке края погружались на 2 см ниже уровня воды. Для предотвращения нагрева от солнечной радиации камеры экранировали алюминиевой фольгой. Каждая камера была оснащена пробоотборным портом с резиновой пробкой и защитным фильтром, соединенным с 50-сантиметровой ПВХ-трубкой (внешний диаметр 4 мм) и запорным краном типа «луер-лок».

Перед началом экспозиции вся пробоотборная линия прокачивалась окружающим воздухом для удаления остаточных газов. Каждая камера удерживалась на месте установки с помощью индивидуального якоря через отдельный поплавок, который служил буфером и стабилизатором. Такая конструкция исключала непосредственное механическое воздействие якоря на донные осадки в зоне измерения, предотвращая искусственную эмиссию пузырькового метана под камеру.

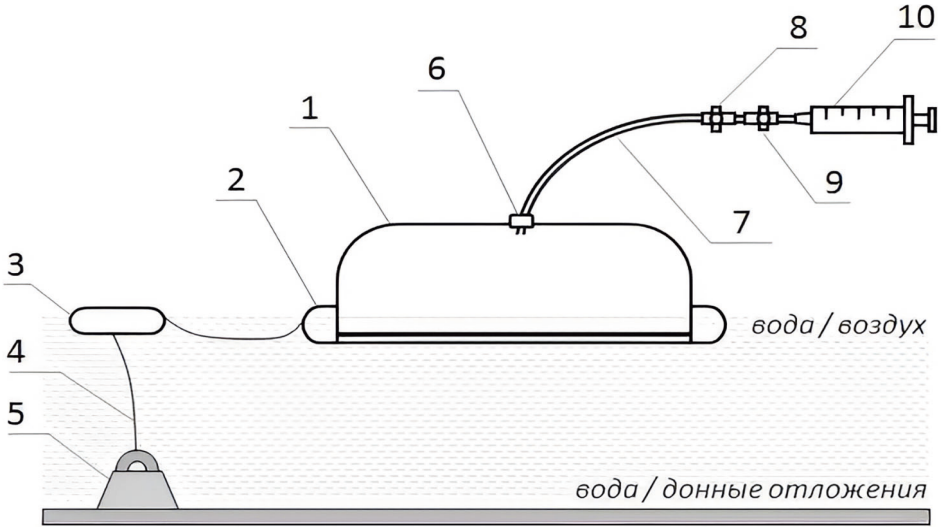


Рис. 2. Устройство плавающей камеры для оценки удельных потоков CH_4: 1 – корпус плавающей камеры, 2 – поплавок по периметру камеры, 3 – отдельный поплавок, 4 – соединяющий трос, 5 – якорь, 6 – резиновый уплотнитель, 7 – ПВХ-трубка, 8 и 9 – трехходовой запорный кран с соединением типа «луер-лок», 10 – полипропиленовый шприц для отбора воздушной пробы из внутреннего пространства камеры (представлены не в масштабе)

Fig. 2. Floating chamber design for CH_4 flux measurement: 1 – floating chamber body, 2 – peripheral float, 3 – additional float, 4 – connecting rope, 5 – anchor, 6 – rubber seal, 7 – PVC tube, 8 and 9 – three-way stopcock with a luer-lock connection, 10 – polypropylene syringe for air sample collection from the chamber headspace (not to scale)

На каждой станции камеры экспонировали одновременно в течение 30–60 мин. Пробы газа объемом 100 мл отбирали в момент начала (t_0) и окончания (t_1) экспозиции с использованием 150-миллиметровых полипропиленовых шприцев, снабженных трехходовым запорным краном. Перед отбором конечной пробы воздух в камере гомогенизировали путем пятикратного прокачивания через присоединенный шприц.

Параллельно с отбором газовых проб регистрировали координаты и глубину в точке установки (эхолот-картплоттер Humminbird 597cxi HD DI Combo, США), а также температуру и концентрацию растворенного кислорода в поверхностном и придонном слоях воды (оксиметр МАРК-303Э, Россия). Для метеопараметров использовались данные метеостанции.

Анализ проб на содержание CH_4 выполняли в течение 24 ч после отбора на газовом хроматографе Nexis GC-2030 (Shimadzu, Япония), оснащенном системой автоматического парофазного анализа HS-20 и программным обеспечением LabSolution. Стеклянные хроматографические виалы объемом 20 мл, загерметизированные бутилкаучуковыми пробками и алюминиевыми обжимными крышками, заполняли газовой фазой из шприца-пробоотборника методом вытеснения в сосуде, заполненном дегазированной дистиллированной водой.

Разделение компонентов проводили на капиллярной колонке Rt-Q-BOND PLOT (Restek, США) длиной 30 м, с внутренним диаметром 0,53 мм, толщиной пленки неподвижной фазы 20 мкм. Концентрацию CH_4 (млн$^{-1}$) детектировали с помощью пламенно-ионизационного детектора. В качестве газа-носителя использовали гелий (чистотой 99,9999 %) при скорости потока 10 мл·мин$^{-1}$. Объем вводимой пробы составлял 10 мкл, общее время анализа – 5 мин на образец.

Удельный поток CH_4 (F_{CH4}, мг CH_4·м$^{-2}$·сут$^{-1}$) рассчитывали по изменению его концентрации в камере за время экспозиции с использованием формулы:

$$F_{CH_4} = \frac{\Delta C \times V \times P \times M}{\Delta t \times A \times R \times T},$$

где $\Delta C/\Delta t$ – скорость изменения концентрации CH_4 в камере (млн$^{-1}$·ч$^{-1}$);

V – объем камеры (0,008 м^3);

A – площадь покрытия водной поверхности (0,075 м^2);

P – атмосферное давление (Па);

M – молярная масса CH_4 (16,04 г·моль);

R – универсальная газовая постоянная (8,3145 м^3·Па·К$^{-1}$·моль$^{-1}$);

T – температура воздуха (К).

В формуле учтены коэффициенты: 10^{-6} – для перевода миллионных долей в безразмерные единицы, 24 – для пересчета почасового потока в суточный, 1000 – для представления результата в миллиграммах. Всего за период исследований выполнен 41 камерный эксперимент.

Статистическую обработку проводили в программе Statistica 10 (StatSoft, США). Корреляционный анализ выполняли с использованием коэффициента

ранговой корреляции Спирмена (r_S). Статистически значимыми считали значения при $p < 0,05$. Если не указано иного, данные представлены как среднее арифметическое ± стандартная ошибка среднего. Принято соглашение, согласно которому положительные значения потока соответствуют эмиссии CH_4 из воды в атмосферу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют высокую пространственную и временную изменчивость эмиссии CH_4 в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища (таблица). На станции 1, расположенной на открытом мелководье, удельный поток CH_4 варьировал от 0 до 74,1 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$, составляя в среднем 22,9 ± 3,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ за весь период наблюдений. В отличие от нее, на станции 2, в полузамкнутой заросшей протоке, поток был в среднем на порядок выше (231,8 ± 50,3 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) и изменялся в более широком диапазоне значений – от 10,2 до 623,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$.

Таблица. Удельные потоки CH_4 (мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) на станциях мелководной зоны Куйбышевского водохранилища
Table. CH_4 fluxes (mg $CH_4 \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$) at the sampling sites in the shallow-water zone of the Kuibyshev Reservoir

Станция (n)	Дата съемки	Среднее	Медиана	Интервал величин	SD	SE
2 (9) *	30.06.2024	76,9	61,5	10,2–190,9	72,1	24,0
1 (3)	10.07.2024	41,1	30,7	18,6–74,1	29,2	16,8
2 (4)	10.07.2024	573,8	576,5	518,8–623,5	51,7	25,9
1 (10)	20.08.2024	21,1	15,0	8,4–40,1	13,8	4,4
2 (5)	20.08.2024	236,9	266,5	122,1–368,9	99,4	44,5
1 (8)	27.09.2024	18,4	18,3	0,0–29,4	9,7	3,4
1 (21)	10.07–27.09	22,9	18,6	0,0–74,1	16,2	3,5
2 (18)	30.06–20.08	231,8	172,6	10,2–623,5	213,2	50,3
1–2 (39)	30.06–27.09	119,3	33,8	0,0–623,5	177,8	28,5

Примечание: n – количество измерительных камер. * – в июне камеры на станции 2 устанавливали непосредственно в прибрежной литорали, в зарослях макрофитов; в последующие месяцы замеры проводили в акватории протоки на удалении от берега. Станция 1 на всех этапах работ располагалась на открытом мелководье. Для периодов (например, 10.07–27.09) приведена статистика по всем проведенным измерениям. SD – стандартное отклонение, SE – стандартная ошибка среднего.

Параллельные измерения выявили существенные различия в условиях на станциях, которые совпали по времени с периодами максимальной эмиссии CH_4. В июле, в период регистрации пиковых потоков, температура поверхности воды на станциях достигала 26,5–27,2 °C. При этом на станции 2 наблюдалась термическая и кислородная стратификация: температура у дна на глубине

4 м опускалась до 19,9 °C, а концентрация растворенного кислорода составляла всего 0,2 мг·дм$^{-3}$, создавая придонные анаэробные условия, способствующие метаногенезу. В то же время на станции 1 кислородный режим на схожей глубине был существенно благоприятнее, с концентрацией 9,6 мг·дм$^{-3}$ у поверхности и 5,7 мг·дм$^{-3}$ у дна.

Для определения движущих факторов эмиссии CH_4 был проведен корреляционный анализ. На станции 2 выявлены статистически значимые сильные связи: поток CH_4 демонстрировал положительную корреляцию с глубиной (r_S = 0,743, p < 0,001) и концентрацией кислорода у поверхности (r_S = 0,798, p < 0,001), а также сильную отрицательную корреляцию с концентрацией кислорода у дна (r_S = –0,818, p < 0,001). На станции 1 значимых корреляций с гидрофизическими и гидрохимическими параметрами не обнаружено. Для объединенной выборки (n = 39) подтверждается значимая отрицательная зависимость потока CH_4 от концентрации кислорода у дна (r_S = –0,692, p < 0,001).

Максимальные значения эмиссии на обеих станциях были зафиксированы в июле. В этот период на станции 2 был отмечен абсолютный максимум серии – 623,5 мг CH_4·м$^{-2}$·сут$^{-1}$. За период наблюдений также были зафиксированы два аномально высоких значения потока, которые не учитывались при расчете средних величин в таблице в силу их экстремальности и стохастической природы: 271,6 мг CH_4·м$^{-2}$·сут$^{-1}$ на станции 1 в июле и 4,82 г CH_4·м$^{-2}$·сут$^{-1}$ на станции 2 в августе. Оба случая, вероятно, связаны с эпизодами пузырьковой эмиссии.

Различия в режиме эмиссии между станциями также подтверждались прямыми натурными наблюдениями. На станции 2, наряду с высокими и экстремальными значениями потоков, регулярно визуально фиксировался выход пузырей газа на поверхность воды, что прямо указывает на значительный вклад пузырькового механизма. На станции 1 такие явления не наблюдались, что соответствует более низким и стабильным значениям потока, характерным для диффузионного переноса.

Любое водохранилище представляет собой сложную природно-техногенную систему, в которой процессы эмиссии и стока парниковых газов зависят от взаимодействия множества факторов. Гидрологические, физико-химические и биологические характеристики водохранилища оказывают существенное влияние на процессы газообмена, формируя пространственно-временные паттерны потоков парниковых газов. Эти закономерности отражают сложное взаимодействие экосистемных процессов, включая особенности уровенного режима, температурные градиенты и биологическую продуктивность [18, 19]. Среди них особое значение имеют морфометрические особенности водохранилища, термический и кислородный режимы, а также трофический статус водоема [20]. Совокупное действие этих параметров контролирует фундаментальные процессы углеродного цикла: разложение органического вещества (включая анаэробный метаногенез) и окисление CH_4 (преимущественно

аэробную метанотрофию), а также диффузионный и турбулентный перенос газов через границу «вода – атмосфера». Их влияние может быть прямым – как в случае стимуляции метаногенеза при дефиците кислорода, – так и косвенным, опосредованным изменением связанных физико-химических и биологических процессов.

Проведенное исследование показало значительную пространственную и временную изменчивость эмиссии CH_4 в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища. Наблюдаемые закономерности определяются локальными условиями и в целом согласуются с данными по водохранилищам Волжско-Камского каскада [13] и водоемам умеренной зоны в целом [2].

Выявленное значительное различие в потоках между станциями обусловлено комплексом факторов, ключевым из которых, вероятно, является кислородный режим. Это находит прямое статистическое подтверждение: на станции 2 поток CH_4 демонстрировал сильную отрицательную корреляцию с концентрацией кислорода у дна ($r_S = -0{,}814$, $p < 0{,}001$), для объединенной выборки по обеим станциям эта зависимость также оставалась значимой и высокой ($r_S = -0{,}715$, $p < 0{,}001$). Выраженная придонная гипоксия (≤ 0,5 мг·дм$^{-3}$) на станции 2 создавала благоприятные условия для метаногенеза, что полностью согласуется с установленной ролью аноксии в интенсификации метаногенеза [21], что в сочетании с прогревом воды привело к максимальным значениям эмиссии. Летнее повышение температуры не только снижает растворимость CH_4, но и напрямую стимулирует образование CH_4 в донных отложениях [22], создавая двойной эффект. Напротив, более благоприятный кислородный режим на станции 1 (5,7 мг·дм$^{-3}$ у дна) не только выступал естественным ограничителем активности метаногенных архей, но и способствовал аэробному окислению CH_4 в водной толще. Этот процесс, в ходе которого метанотрофные микроорганизмы эффективно снижают эмиссию CH_4, окисляя его до CO_2 [23], играет важнейшую роль в уменьшении чистых выбросов CH_4 в мелководных водоемах [24].

Таким образом, кислородный режим, выступая в роли основного лимитирующего фактора, напрямую регулирует состав и функцию микробного сообщества, в конечном счете определяя баланс между продукцией и окислением CH_4 в водной толще [25], а имеющийся градиент условий наглядно демонстрирует, как локальные особенности могут формировать соседствующие «горячие точки» и зоны с умеренной эмиссией в пределах одной акватории.

Существенную роль в формировании выявленного контраста сыграли морфометрические особенности участков, которые предопределили различия в их гидродинамическом и трофическом режимах. Полузамкнутая протока станции 2, представляющая собой затопленную межгрядовую депрессию поймы, защищенную древесной растительностью от ветро-волнового воздействия, способствует аккумуляции богатых органическим веществом илистых наносов. О роли морфометрии косвенно свидетельствует и выявленная

на станции 2 положительная корреляция потока CH_4 с глубиной (r_S = 0,743, p < 0,001), что отражает усиление стратификации и аноксии в более глубоких частях протоки. Ограниченный водообмен с основной частью водохранилища и сниженная интенсивность циркуляции водных масс в условиях такой морфологии благоприятствуют развитию устойчивой стратификации и придонного дефицита кислорода [16], формируя тем самым комплекс предпосылок для интенсивного метаногенеза. Более того, аккумуляция органического вещества, служащего субстратом, формирует положительную обратную связь: его разложение в анаэробных условиях усиливает эмиссию CH_4 [3, 26].

В противоположность этому, открытая акватория станции 1 подвержена ветровому перемешиванию, характеризуется промывным режимом, интенсивной аэрацией и песчаными донными отложениями. Как показано в исследованиях водохранилищ Волжско-Камского каскада, в условиях постоянного перемешивания водной массы процессы аэробного окисления CH_4 протекают стабильно, практически независимо от колебаний кислородного режима [27]. Эти условия не благоприятствуют накоплению органического вещества и, что важно, способствуют аэробному окислению CH_4 как в толще воды, так и в донных отложениях [24], эффективно снижая его эмиссию. Следовательно, морфометрия участков водохранилища выступает важным фактором, влияющим на эмиссию CH_4 через контроль над аккумуляцией органического вещества и формирование локального кислородного режима.

Влияние морфометрии на аккумуляцию органического вещества подтверждается результатами грунтовых съемок. На станции 2 преобладали илистые осадки с высоким содержанием органического вещества (ППП: 1,2–16,3 %, медиана 8,5 %) и значительной долей пелитовой фракции (< 0,01 мм), в среднем составлявшей 11,5 ± 6 %. В прибрежной зоне этой станции отложения дополнительно обогащались лиственным опадом и неразложившимися растительными остатками высшей водной растительности. Это полностью согласуется с установленной для Куйбышевского водохранилища зависимостью, согласно которой содержание органического вещества закономерно возрастает в ряду «песок → илистый песок → ил», а основная доля органического углерода сосредоточена именно в тонкодисперсных фракциях [28]. Такие илистые, обогащенные органикой грунты, являются зонами максимальной потенциальной метаногенной активности в водохранилищах Волжско-Камского каскада [3]. В нашем случае на станции 1 преобладали песок и илистый песок с низким содержанием органического вещества (ППП: 1,0–9,6 %, медиана 1,4 %), что характерно для открытых акваторий водохранилища и что обусловливает преимущественно диффузионный путь эмиссии.

Отдельного внимания заслуживает потенциальный вклад водной растительности в общую эмиссию на станции 2. Довольно высокий поток, зафиксированный в июне в литорали, заросшей тростником (*Phragmites australis*

(Cav.) Trin. ex Steud.), может быть связан не только с пузырьковой эмиссией и диффузией из водной толщи, но и с дополнительным поступлением метана, опосредованным растениями. Хотя используемая методика не позволяет напрямую количественно разделить эти пути, расположение камер вблизи зарослей теоретически давало возможность уловить интегральный поток, который мог включать как диффузию метана, поступившего в воду из подводных частей растений, так и, потенциально, прямую эмиссию вблизи оснований стеблей. Помимо этого возможного прямого влияния, присутствие растительности могло косвенно усиливать эмиссию за счет создания дополнительного субстрата для метаногенеза через корневые экссудаты и отмершую биомассу [29], а также через удержание и накопление в прибрежной зоне аллохтонного органического вещества с водосбора [4].

Для водохранилищ Волжско-Камского каскада, в частности, показано, что массовое отмирание высшей водной растительности в конце лета приводит к формированию ярко выраженного пика метаногенеза в донных отложениях зарастающей литорали [27]. Следует отметить, что легкодоступное органическое вещество именно такого типа, в отличие от трудноразлагаемого опада наземных деревьев, рассматривается в качестве основного фактора, стимулирующего активность метаногенных архей в донных отложениях [30]. Более того, исследования показывают, что тростник обладает способностью к активному внутреннему транспорту газов (так называемому потоку под давлением – *pressurized flow*), что может делать его особенно эффективным каналом для поступления метана из донных отложений в атмосферу [31]. Таким образом, высшая водная растительность является потенциально значимым фактором, способным влиять на эмиссию через целый комплекс прямых и косвенных механизмов, что подчеркивает необходимость ее целенаправленного изучения в будущих исследованиях газового баланса мелководий водохранилища.

Выявленные различия в гидрофизических, гидрохимических и морфометрических условиях предопределяют доминирование различных механизмов эмиссии на участках исследования. Совокупность нескольких независимых признаков – значительно более высокие и вариабельные потоки, визуально наблюдаемый выход пузырей и экстремальные точечные выбросы (до 4,82 г $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) – явно указывает на преобладание пузырькового транспорта на станции 2. Полученные данные наглядно иллюстрируют тезис, согласно которому большая часть пузырькового потока обеспечивается небольшим количеством крупных, стохастических выбросов [32]. Это подчеркивает высокий риск недооценки эмиссии при недостаточно плотном отборе проб, поскольку непреднамеренное исключение подобных «горячих точек» может привести к значительному занижению общих выбросов. На станции 1, где потоки были умеренными и стабильными, вероятнее всего, преобладал диффузионный путь поступления CH_4 в атмосферу.

Полученные данные согласуются с картиной эмиссии, характерной как для основной акватории (1,5–71,3 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$), так и для пойменных участков и заливов (до 304–651 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) Куйбышевского водохранилища [13]. Наблюдаемые максимальные потоки на станции 2 (~ 624 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) близки к значениям, зарегистрированным в Черемшанском заливе, который также характеризуется летней гипоксией, вызванной плотностной стратификацией. Это подтверждает, что именно мелководные, изолированные и стратифицированные участки могут являться определяющими источниками пространственной вариабельности и, вероятно, вносят значительный вклад в общий бюджет эмиссии CH_4. Более того, морфология станции 2 (полузамкнутая протока – залив) является типичной для береговой зоны водохранилища, где широко распространены отчленившиеся заливы, сформировавшиеся в результате затопления эрозионных форм рельефа [33]. Сходство режимов между станцией 2 и другими изолированными акваториями водохранилища подтверждает, что мелководные изолированные участки, подверженные сезонной стратификации, могут представлять собой широко распространенный тип «горячих точек» эмиссии, а выявленная связь «стратификация – гипоксия – интенсивный метаногенез» может быть для них универсальной.

Диапазоны потоков для Куйбышевского водохранилища (0–623,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) соответствуют, в том числе, общемировым данным [2] для мезотрофных (4,3–392,0 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) и эвтрофных (6,4–2296,5 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) водоемов. При этом максимальные значения эмиссии, вероятно связанные с пузырьковым транспортом, хорошо попадают в диапазон, типичный для пузырькового потока эвтрофных водохранилищ (0,0–734,3 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$), что позволяет считать режим эмиссии CH_4 Куйбышевского водохранилища типичным для водоемов своего класса.

Сопоставимость полученных принципиально разными методами данных служит важным подтверждением надежности оценок эмиссии [1]. Так, измерения методом турбулентных пульсаций, выполненные на акватории станции 1 (среднее ± стандартное отклонение), показали средние значения потока 52,84 ± 22,49 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ в августе и 47,53 ± 27,06 $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ в сентябре 2024 г. [11]. Эти величины хорошо согласуются с диапазоном значений, полученных нами в те же месяцы методом плавучих камер (до 40,1 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$). Совпадение данных, полученных с помощью точечного камерного метода и интегрального метода вихревой ковариации, подтверждает достоверность этих результатов.

ВЫВОДЫ

Проведенное методом плавучих камер исследование позволило количественно оценить эмиссию CH_4 в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища и выявить контролирующие ее ключевые факторы. В рамках проведенной работы подтверждена гипотеза о чрезвычайно высокой пространственной

неоднородности потоков CH_4. Наличие в пределах одной акватории участков с эмиссией, различающейся на порядок (от ~ 23 до ~ 232 мг $CH_4 \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$ в среднем), демонстрирует невозможность простой экстраполяции точечных замеров на всю акваторию без учета типа биотопа.

Доминирующим фактором, определяющим интенсивность эмиссии, является кислородный режим, который, в свою очередь, тесно связан с морфометрией и гидродинамикой участка. Изолированные, стратифицированные и обогащенные органическим веществом мелководья (такие как протоки и заливы) являются «горячими точками» эмиссии CH_4, где доминирует пузырьковый механизм транспорта. Полученные данные подтверждают, что для точной оценки углеродного следа крупных равнинных водохранилищ, помимо основной акватории, необходимо проводить целенаправленный мониторинг именно мелководных зон, особенно участков с признаками стратификации и гипоксии.

Для будущих исследований целесообразно включение суточной динамики измерений, количественное разделение путей эмиссии (диффузия, пузырьковый перенос, транспорт через сосудистые растения) и масштабирование полученных данных с использованием ГИС-технологий и дистанционного зондирования для построения более точной карты эмиссии CH_4 со всей акватории водохранилища.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no conflict of interest.

Благодарности

Авторы выражают благодарность старшему преподавателю К. О. Потапову и аспиранту К. А. Шевчуку (Казанский федеральный университет) за неоценимую помощь в организации и проведении полевых работ.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Senior Lecturer K. O. Potapov and Post-graduate Student K. A. Shevchuk for their invaluable assistance in the works' organization and conducting.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saunois M., Martinez A., Poulter B. et al. Global methane budget 2000–2020 // Earth System Science Data. 2025. Vol. 17 (5). P. 1873–1958. https://doi.org/10.5194/essd-17-1873-2025
2. Rosentreter J. A., Borges A. V., Deemer B. R. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // Nature Geoscience. 2021. Vol. 14 (4). P. 225–230. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2
3. Дзюбан А. Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 187 с.

4. Федоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Косолапов А. Е. и др. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–82. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72
5. Bastviken D., Johnson M. S. Future methane emissions from lakes and reservoirs // Nature Water. 2025. https://doi.org/10.1038/s44221-025-00532-6
6. Bodmer P., Bors C., Liu L., Lorke A. Large sediment methane production potential in reservoirs compared to lakes and rivers // Limnology and Oceanography. 2025. Vol. 70 (6). P. 1561–1574. https://doi.org/10.1002/lno.70063
7. Fedorov M. P., Elistratov V. V., Maslikov V. I. et al. Reservoir Greenhouse gas emissions at Russian HPP // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49 (1). P. 33–39. https://doi.org/10.1007/s10749-015-0569-3
8. Moras S., Zellmer U. R., Hiltunen E., Grasset C., Sobek S. Predicting methane formation rates of freshwater sediments in different biogeographic regions // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2024. Vol. 129(1). https://doi.org/10.1029/2023jg007463
9. Гречушникова М. Г., Школьный Д. И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 58–71. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-2-5
10. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации. М: Институт глобального климата и экологии, 2023. 345 с.
11. Nikitin O. V., Stepanova N. Yu., Aukhadeev T. R., Latypova V. Z. Greenhouse gas fluxes (CH4, CO2) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study // Limnology and Freshwater Biology. 2025. № 4. P. 995–1012. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-995
12. Селезнев В. А. Межгодовые изменения водности реки Волги в условиях глобальных климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 6. С. 7–21. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-6-7-21
13. Гречушинкова М. Г., Репина И. А., Фролова Н. Л. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913. https://doi.org/10.31857/S2587556623060055
14. Латыпова В. З., Степанова Н. Ю., Кондратьева Т. А., Никитин О. В. Мониторинг поверхностных вод Куйбышевского водохранилища в районе водного участка полигона «Карбон – Поволжье» // Российский журнал прикладной экологии. 2023. № 4 (36). С. 39–49. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.39.49
15. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) / отв. ред. Г. С. Розенберг, Л. А. Выхристюк. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.
16. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biogeochemical Cycles. 2004. Vol. 18 (4). GB4009. https://doi.org/10.1029/2004gb002238
17. Bastviken D., Santoro A. L., Marotta H. et al. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environmental Science & Technology. 2010. Vol. 44 (14). P. 5450–5455. https://doi.org/10.1021/es1005048
18. Hansen C. H., Matson P. G., Griffiths N. A. Diversity in reservoir surface morphology and climate limits ability to compare and upscale estimates of greenhouse gas emissions // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 893. Iss. 164851. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164851
19. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Косолапов А. Е., Усова Е. В., Анпилова Е. Л. Анализ факторов формирования концентраций и эмиссионных потоков метана в водохранилищах // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 37–50. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50
20. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С. и др. Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100

21. Maruya Y., Nakayama K., Sasaki M., Komai K. Effect of dissolved oxygen on methane production from bottom sediment in a eutrophic stratified lake // Journal of Environmental Sciences. 2023. Vol. 125. P. 61–72. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.025
22. Yvon-Durocher G., Allen A. P., Bastviken D. et al. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales // Nature. 2014. Vol. 507 (7493). P. 488–491. https://doi.org/10.1038/nature13164
23. Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved // Environmental Microbiology Reports. 2009. Vol. 1 (5). P. 285–292. https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x
24. Martinez D., Anderson M. A. Methane production and ebullition in a shallow, artificially aerated, eutrophic temperate lake (Lake Elsinore, CA) // Science of The Total Environment. 2013. Vol. 454–455. P. 457–465. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.040
25. Grasset C., Mendonça R., Villamor Saucedo G. et al. Large but variable methane production in anoxic freshwater sediment upon addition of allochthonous and autochthonous organic matter // Limnology and Oceanography. 2018. Vol. 63 (4). P. 1488–1501. https://doi.org/ 10.1002/lno.10786
26. Beaulieu J. J., DelSontro T., Downing J. A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century // Nature Communications. 2019. Vol. 10 (1). https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5
27. Дзюбан А. Н. Цикл метана в грунтах водохранилищ Волжско-Камского каскада и его роль в деструкции органического вещества // Труды Института биологии внутренних вод. 2016. № 74 (77). С. 21–36. https://doi.org/10.24411/0320-3557-2016-10008
28. Законнов В. В., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р. и др. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 6. Донные отложения Куйбышевского водохранилища и их картирование с использованием геоинформационных технологий // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 72–89. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1332968
29. Bodmer P., Vroom R. J. E., Stepina T., del Giorgio P. A., Kosten S. Methane dynamics in vegetated habitats in inland waters: quantification, regulation, and global significance // Frontiers in Water. 2024. Vol. 5. Iss. 1332968. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1332968
30. Emilson, E. J. S., Carson M. A., Yakimovich K. M. et al. Climate-driven shifts in sediment chemistry enhance methane production in northern lakes // Nature Communications. 2018. Vol. 9 (1). Iss. 1801. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04236-2
31. van den Berg M., van den Elzen E., Ingwersen J. et al. Contribution of plant-induced pressurized flow to CH4 emission from a Phragmites fen // Scientific Reports. 2020. Vol. 10 (1). Iss. 12304. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69034-7
32. DelSontro T., McGinnis D F., Wehrli B., Ostrovsky I. Size does matter: importance of large bubbles and small-scale hot spots for methane transport // Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49 (3). P. 1268–1276. https://doi.org/10.1021/es5054286
33. Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Safin I. M. Spatial distribution and hydrographic characteristics analysis in detached bays of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev reservoir // Russian Journal of Applied Ecology. 2025. No. 2 (42). P. 66–70. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.66.70

REFERENCES

1. Saunois M., Martinez A., Poulter B. et al. Global methane budget 2000–2020. *Earth System Science Data*. 2025. Vol. 17 (5). P. 1873–1958. https://doi.org/10.5194/essd-17-1873-2025
2. Rosentreter J. A., Borges A. V., Deemer B. R. et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience.* 2021. Vol. 14 (4). P. 225–230. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2
3. Dziuban A. N. Destruction of organic matter and the methane cycle in bottom sediments of internal water bodies. Yaroslavl: Printhouse, 2010. 187 p. (In Russ.).

4. Fedorov Y. A., Garkusha D. N., Kosolapov A. E. et al. Artificial water bodies as methane genesis hotbeds (the Tsimlyansk Reservoir as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies*, Management. 2024. No. 3. P. 68–72. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72
5. Bastviken D., Johnson M. S. Future methane emissions from lakes and reservoirs. Nature Water. 2025. https://doi.org/10.1038/s44221-025-00532-6
6. Bodmer P., Bors C., Liu L., Lorke A. Large sediment methane production potential in reservoirs compared to lakes and rivers. *Limnology and Oceanography.* 2025. Vol. 70 (6). P. 1561–1574. https://doi.org/10.1002/lno.70063
7. Fedorov M. P., Elistratov V. V., Maslikov V. I. et al. Reservoir Greenhouse gas emissions at Russian HPP. *Power Technology and Engineering.* 2015. Vol. 49 (1). P. 33–39. https://doi.org/10.1007/s10749-015-0569-3
8. Moras S., Zellmer U. R., Hiltunen E., Grasset C., Sobek S. Predicting methane formation rates of freshwater sediments in different biogeographic regions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences.* 2024. Vol. 129 (1). https://doi.org/10.1029/2023jg007463
9. Grechushnikova M. G., Shkolniy D. I. Estimation of methane emission from reservoirs of Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2019. No. 2. P. 58–71. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-2-5
10. Assessment of greenhouse gas fluxes in ecosystems of the Russian Federation regions. M.: Institute of Global Climate and Ecology, 2023. 345 p. (In Russ.).
11. Nikitin O. V., Stepanova N. Y., Aukhadeev T. R., Latypova V. Z. Greenhouse gas fluxes (CH_4, CO_2) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study. *Limnology and Freshwater Biology.* 2025. № 4. P. 995–1012. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-995
12. Seleznev V. A. Inter/annual changes in the Volga River water content under global climate change. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 6. P. 7–21. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-6-7-21
13. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Frolova N. L. et al. Methane concentration and fluxes in Volga River reservoirs. *Newsletters of the Russian Academy of Sciences. Series Geography.* 2023. Vol. 87 (6). P. 899–913. https://doi.org/10.31857/S2587556623060055 (In Russ.).
14. Latypova V. Z., Stepanova N. Y., Kondratieva T. A., Nikitin O. V. Monitoring of Kuibyshev reservoir surface water in the area of the "Carbon – Povolgye" polygon water section. *Russian Journal of Applied Ecology.* 2023. No. 4 (36). P. 39–49. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.39.49
15. Kuibyshev Reservoir (scientific information guide) / ed. by G. S. Rozenberg, L. A. Vykhristiuk. Togliatti: IEVB RAS, 2008. 123 p. (In Russ.).
16. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles.* 2004. Vol. 18 (4). GB4009. https://doi.org/10.1029/2004gb002238
17. Bastviken D., Santoro A. L., Marotta H. et al. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science & Technology.* 2010. Vol. 44 (14). P. 5450–5455. https://doi.org/10.1021/es1005048
18. Hansen C. H., Matson P. G., Griffiths N. A. Diversity in reservoir surface morphology and climate limits ability to compare and upscale estimates of greenhouse gas emissions. *Science of The Total Environment.* 2023. Vol. 893. Iss. 164851. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164851
19. Gar'kusha D., Fedorov Y., Kosolapov A., Usova E., Anpilova E. The factors of methane concentrations and emission fluxes formation analysis in water reservoirs. *Anthropogenic Transformation of Nature.* 2024. Vol. 10(1). P. 37–50. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50
20. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Kazantsev V. S. et al. First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and emission in the Tsimlyansk reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 2. P. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100
21. Maruya Y., Nakayama K., Sasaki M., Komai K. Effect of dissolved oxygen on methane production from bottom sediment in a eutrophic stratified lake. *Journal of Environmental Sciences.* 2023. Vol. 125. P. 61–72. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.025

22. Yvon-Durocher G., Allen A. P., Bastviken D. et al. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*. 2014. Vol. 507 (7493). P. 488–491. https://doi.org/10.1038/nature13164
23. Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environmental Microbiology Reports.* 2009. Vol. 1 (5). P. 285–292. https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x
24. Martinez D., Anderson M. A. Methane production and ebullition in a shallow, rtificially aerated, eutrophic temperate lake (Lake Elsinore, CA). *Science of The Total Environment.* 2013. Vol. 454–455. P. 457–465. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.040
25. Grasset C., Mendonça R., Villamor Saucedo G. et al. Large but variable methane production in anoxic freshwater sediment upon addition of allochthonous and autochthonous organic matter. *Limnology and Oceanography.* 2018. Vol. 63 (4). P. 1488–1501. https://doi.org/ 10.1002/lno.10786
26. Beaulieu J. J., DelSontro T., Downing J. A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*. 2019. Vol. 10 (1). https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5
27. Dziuban A. N. The methane cycle and their role in the destruction of organic matter in sediments of reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Proceedings of the Institute of Inland Waters Biology.* 2016. No. 74 (77). P. 21–36. https://doi.org/10.24411/0320-3557-2016-10008
28. Zakonnov V. V., Ivanov D. V., Khasanov R. R. et al. Spatial-temporal transformation of the Volga Reservoirs' soil complex. Communication 6. The Kuybyshev Reservoir bottom sediments and their mapping with the use of geo/information techniques. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Managment.* 2019. No. 2. P. 72–89. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1332968
29. Bodmer P., Vroom R. J. E., Stepina T., del Giorgio P. A., Kosten S. Methane dynamics in vegetated habitats in inland waters: quantification, regulation, and global significance. *Frontiers in Water.* 2024. Vol. 5. Iss. 1332968. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1332968
30. Emilson E. J. S., Carson M. A., Yakimovich K. M. et al. Climate-driven shifts in sediment chemistry enhance methane production in northern lakes. *Nature Communications.* 2018. Vol. 9 (1). Iss. 1801. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04236-2
31. van den Berg M., van den Elzen E., Ingwersen J. et al. Contribution of plant-induced pressurized flow to CH4 emission from a Phragmites fen. *Scientific Reports.* 2020. Vol. 10 (1). Iss. 12304. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69034-7
32. DelSontro T., McGinnis D. F., Wehrli B., Ostrovsky I. Size does matter: importance of large bubbles and small-scale hot spots for methane transport. *Environmental Science & Technology.* 2015. Vol. 49 (3). P. 1268–1276. https://doi.org/10.1021/es5054286
33. Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Safin I. M. Spatial distribution and hydrographic characteristics analysis in detached bays of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev reservoir. *Russian Journal of Applied Ecology. 2025*. No. 2 (42). P. 66–70. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.2.66.70

Сведения об авторах:

Никитин Олег Владимирович, канд. геогр. наук, доцент, инженер-эколог, ООО «Экоаудит», 420061, Россия, г. Казань, ул. Сеченова, д. 17; https://orcid.org/0000-0002-6753-0597; e-mail: olnova@mail.ru. Корреспондирующий автор.

Степанова Надежда Юльевна, д-р биол. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; https://orcid.org/0000-0003-1733-9062; e-mail: step090660@yandex.ru

Новикова Людмила Викторовна, ассистент, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; https://orcid.org/0000-0002-8158-8525; e-mail: ljudmila_88@list.ru

Гордеев Александр Сергеевич, научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; https://orcid.org/0000-0002-1918-305X; e-mail: drgor@mail.ru

Кузьмин Руслан Сергеевич, директор, ООО «Экоаудит», 420061, Россия, г. Казань, ул. Сеченова, д. 17; https://orcid.org/0009-0007-5491-1167; e-mail: ecotexp@yandex.ru

Латыпова Венера Зиннатовна, д-р хим. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18; https://orcid.org/0000-0002-8490-6939; e-mail: ecoanrt@yandex.ru

About the authors:

Oleg V. Nikitin, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Environmental Engineer, Ekoaudit LLC, Russia, 420061, Kazan, Sechenova St., 17; https://orcid.org/0000-0002-6753-0597; e-mail: olnova@mail.ru

Nadezhda Yu. Stepanova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor, Kazan (Volga region) Federal University, Russia, 420008, Kazan, Kremlyovskaya St., 18; https://orcid.org/0000-0003-1733-9062; e-mail: step090660@yandex.ru

Ludmila V. Novikova, Assistant, Kazan (Volga region) Federal University, Russia, 420008, Kazan, Kremlyovskaya St., 18; https://orcid.org/0000-0002-8158-8525; e-mail: ljudmila_88@list.ru

Aleksander S. Gordeev, Research Fellow, Kazan (Volga region) Federal University, Russia, 420008, Kazan, Kremlyovskaya St., 18; https://orcid.org/0000-0002-1918-305X; e-mail: drgor@mail.ru

Ruslan S. Kuzmin, Director, Ekoaudit LLC, Russia, 420061, Kazan, Sechenova St., 17; https://orcid.org/0009-0007-5491-1167; e-mail: ecotexp@yandex.ru

Venera Z. Latypova, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor, Kazan (Volga region) Federal University, Russia, 420008, Kazan, Kremlyovskaya St., 18; https://orcid.org/0000-0002-8490-6939; e-mail: ecoanrt@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 17.11.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 22.12.2025.
Принята к публикации / Accepted 28.01.2026.

УДК 504.465; 556.314; 550.46 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-94-108*

Оригинальная статья/Original paper

Гидрохимический режим Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 годов

Е. А. Шашуловская, С. А. Мосияш

shash.elena2010@yandex.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Саратовский филиал, г. Саратов, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Подледный (зимний) период на водохранилищах в силу естественных факторов способствует формированию специфического гидрохимического режима. Изучение динамики основных гидрохимических компонентов подо льдом является актуальной задачей в связи с современной трансформацией климата, которая проявляется в основном в зимний период и связана с вариациями Североатлантического колебания (North Atlantic Oscillation, NAO) – маркера глобальных атмосферных процессов. В связи с этим цель нашей работы – оценка динамики основных гидрохимических компонентов Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 гг. с учетом изменения его гидрологического режима и метеорологических процессов. **Методы.** Исследовали содержание pH, растворенного кислорода, главных ионов, органического вещества, биогенных элементов по общепринятым методикам. Использовали корреляционный анализ для выявления взаимосвязи между гидрохимическими и гидрологическими параметрами, метод главных компонент – для исследования структуры исходных показателей. **Результаты.** За исследуемый период отмечен положительный тренд суммы ионов натрия и калия и слабая тенденция увеличения содержания хлоридов и сульфатов. Минерализация колебалась в интервале 315–402 мг/дм^3. С динамикой индекса NAO согласуются изменения годового водного притока Волгоградского водохранилища. Отмечена связь между изменениями зимнего притока и индекса NAO за осенний период предшествующего года. Наиболее тесная связь между этими показателями наблюдалась в 2016–2024 гг. с коэффициентом корреляции r = 0,89. Величина зимнего притока связана корреляционными отношениями с показателями общего и аллохтонного органического вещества. Отмечена согласованная динамика между водностью в зимний период и концентрациями минерального азота и общего железа. На содержание хлоридов, сульфатов и лабильного органического вещества значительное влияние оказывает антропогенный фактор. Межгодовая динамика минерального фосфора, в отличие от других исследованных компонентов, более специфична и определяется не только гидрологическими, но и метеорологическими факторами, маркером которых является индекс NAO. Полученные зависимости могут быть использованы для прогноза содержания тех или иных ингредиентов в связи с изменением водного баланса в зимний период.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Волгоградское водохранилище, зимний период, водный сток, солевой состав, органическое вещество, биогенные элементы, индекс Североатлантического колебания

Для цитирования: Шашуловская Е. А., Мосияш С. А. Гидрохимический режим Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 годов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 94–108. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-94-108; EDN: DOUFPK

Hydrochemical conditions of the Volgograd reservoir during the ice-covered periods of 2011–2024

Elena A. Shashulovskaya, Svetlana A. Mosiyash

shash.elena2010@yandex.ru

Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Saratov Branch, Saratov, Russia

ABSTRACT

Relevance. The ice-covered (winter) period on reservoirs, due to natural factors, contributes to the formation of a specific hydrochemical conditions. Studying the dynamics of the main hydrochemical components under the ice is an urgent task due to the current climate transformation, which manifests itself mainly during the winter period and is associated with variations in the North Atlantic Oscillation (NAO), a marker of global atmospheric processes. In this regard, the purpose of our work is to assess the dynamics of the main hydrochemical components of the Volgograd Reservoir during the ice-covered periods of 2011–2024, taking into account changes in its hydrological conditions and meteorological processes. **Methods.** The content of pH, dissolved oxygen, major ions, organic matter, and biogenic elements was studied using conventional methods. Correlation analysis was used to identify the relationship between hydrochemical and hydrological parameters, and the principal component analysis was used to study the structure of the initial indicators. **Results.** During the study period, there was a positive trend in the sum of sodium and potassium ions, and a slight increase in the content of chlorides and sulfates. The mineralization ranged from 315 to 402 mg/dm^3. Changes in the annual water inflow of the Volgograd Reservoir are consistent with the dynamics of the NAO index. There is a correlation between changes in the winter inflow and the NAO index for the autumn period of the previous year. The strongest correlation between these indicators was observed in 2016–2024, with a correlation coefficient of r = 0,89. The magnitude of the winter inflow is correlated with the total and allochthonous organic matter. There is a consistent relationship between winter water content and concentrations of mineral nitrogen and total iron. The content of chlorides, sulfates, and labile organic matter is significantly influenced by anthropogenic factors. Unlike other components studied, the interannual dynamics of mineral phosphorus is more specific and is determined not only by hydrological but also by meteorological factors, as indicated by the NAO index. The obtained dependencies can be used to predict the content of certain ingredients in connection with changes in the water balance during the winter season.

KEYWORDS: Volgograd Reservoir, ice-covered period, water runoff, salt composition, organic matter, biogenic elements, North Atlantic Oscillation Index

For citation: Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. Hydrochemical conditions of the Volgograd reservoir during the ice-covered periods of 2011–2024. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 1. P. 94–108. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-94-108; EDN: DOUFPK

ВВЕДЕНИЕ

Волгоградское водохранилище, как крупный водоем комплексного назначения, замыкающий Волжский каскад, в силу своей значимости является объектом многолетних гидрохимических исследований, которые проводятся в основном в весенне-осенний (безледный) период [1–3 и др.]. Между тем в зимний сезон в результате современной трансформации климата наблюдают-

ся частые зимние оттепели, уменьшается промерзание почвы, увеличивается частота зимних паводков с инфильтрацией талых и пополнением грунтовых вод, сокращаются сроки ледостава на реках и водохранилищах [4–7]. Ледостав на Волгоградском водохранилище в настоящее время сократился до 50–105 сут. В этот период ряд естественных факторов (прекращение внешнего газообмена водных масс, резкое уменьшение ветро-волнового воздействия и активности биоты, низкая температура, отсутствие поверхностного стока, преобладание грунтового питания) приводит к замедлению внутриводоемных процессов и способствует формированию специфического гидрохимического режима. Это делает все более актуальным изучение динамики основных гидрохимических компонентов подо льдом и роли этого периода в процессах всей экосистемы.

Опубликованные в современной литературе материалы зимних гидрохимических исследований немногочисленны [8–12]. В подледный период отмечается уменьшение концентрации растворенного кислорода вследствие снижения гидродинамической активности и уровня фотосинтеза. Содержание кислорода определяется глубиной водоема и скоростью разложения органики. Соответственно, последствия органического загрязнения зимой проявляются более четко. Увеличиваются минерализация и содержание минеральных форм азота и фосфора преимущественно за счет подземного питания и антропогенной нагрузки. В подледный период на водохранилищах сезонного регулирования стока снижается уровень воды вследствие естественного уменьшения приточности на фоне расходования воды для нужд энергетики и водоснабжения [13]. Следствием понижения уровня воды является образование значительных площадей обсыхания ледяного покрова, перемещение зон переменного подпора, изменение конфигурации береговой линии. В результате наблюдается значительная гетерогенность концентраций химических ингредиентов по акватории [12].

Бассейн Волги, занимающий практически всю территорию европейской части России южнее 60° с.ш., находится в зоне влияния Северной Атлантики, что является важнейшим фактором режима тепло- и влагообеспеченности в регионе [14]. Степень этого воздействия зависит от усиления или ослабления зонального переноса, показателем которого является индекс Североатлантического колебания (North Atlantic Oscillation, NAO).

Цель данной работы – оценка динамики гидрохимического режима Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 гг. с учетом изменения его притока, а также глобальных атмосферных процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал отбирали в 2011, 2013, 2014, 2016–2024 гг. со льда преимущественно в феврале на русловых и литоральных участках верхней зоны водохранилища: выше (ст. Пристанное, Усть-Курдюм, Затон) и ниже г. Саратова (ст. Увек, Князевка). Всего отобрано и обработано 68 проб. Исследования ги-

дрохимического режима проводили по показателям реакции среды pH, кислородного режима, солевого состава, биогенных и органических веществ по стандартным методикам. Минерализацию оценивали расчетным методом как сумму показателей главных ионов.

Объем водного притока к водохранилищу через плотину Саратовской ГЭС рассчитывали по данным, доступным на сайте ПАО «РусГидро»[1]. Трансформированные ряды значений индекса NAO заимствованы из открытого доступа[2]. Сумма атмосферных осадков получена из архива[3] и была рассчитана за сентябрь – декабрь предшествующего года по данным метеостанции г. Казани, поскольку территория Средней Волги является стокообразующей для водохранилищ Нижней Волги. Объем зимнего притока и величину индекса NAO_w оценивали как сумму показателей за декабрь предыдущего года и январь и февраль текущего. Также в расчетах использовали суммарное значение индекса NAO_o за сентябрь – декабрь предшествующего года.

Коэффициенты детерминации (R^2) и корреляции Пирсона (r) вычисляли в MS Excel 2010 и STATISTICA 10, статистическую достоверность оценивали при уровне значимости (p) < 0,05. Использовали метод главных компонент для исследования структуры исходных гидрохимических показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидролого-климатические характеристики в период исследования

Основное влияние на формирование гидрохимического режима Волгоградского водохранилища оказывает вышерасположенное Саратовское водохранилище. Боковая приточность в Волгоградском водохранилище незначительна (< 1 % от общего поверхностного притока) [15]. За исследуемый период объем зимнего притока фиксировали в пределах 37,0–57,6 км^3 (табл. 1), и его динамика согласованно изменялась с годовыми величинами с коэффициентом корреляции r = 0,76 при p = 0,00. Синхронность колебания этих показателей прослеживается для большинства рек европейской части России [16].

В маловодные годы (2011, 2015, 2022, 2023) объем зимнего притока к Волгоградскому водохранилищу колебался в пределах 37,0–39,4 км^3, в многоводные (2013, 2017, 2020) – возрастал в 1,2–1,5 раза. Увеличение водности рек в зимний период определяется сложными взаимосвязями метеорологических и стоковых характеристик, в основе которых могут лежать повышение количества осадков за предшествующий осенний период и изменение режима температуры воздуха [16]. Количество осенних осадков определяет водность зимнего

1 Филиал ПАО «РусГидро» – «Саратовская ГЭС», RUS. URL: http://www.volges.rushydro.ru (дата обращения: 25.08.2025).

2 National Weather Service, Climate Prediction Center, USA. Web page. URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml (дата обращения: 13.05.2025).

3 Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД), RUS. URL: http://www.meteo.ru (дата обращения 10.09.2025).

периода и формирует запасы подземных вод, которые играют основную роль в питании реки в этот период. Сумма отрицательных температур воздуха в зимний период сокращает сток на водосборе из-за более глубокого промерзания почв. Диапазон количества атмосферных осадков, выпавших в районе Средней Волги, колебался от 113 до 306 мм с максимумом в период 2011–2012 гг. и в 2023 г. Самой теплой была зима 2020 г., холодной – 2011 г. Возможно, сложные взаимодействия вышеуказанных метеорологических характеристик (табл. 1) могли обусловить в определенной степени динамику зимнего притока к Волгоградскому водохранилищу.

Таблица 1. Гидролого-климатические характеристики исследуемого периода 2011–2024 гг.
Table 1. Hydrological and climatic characteristics of the study period 2011–2024

Год	Зимний приток к Волгоградскому водохранилищу, км^3	Годовой приток к Волгоградскому водохранилищу, км^3	NAO_o	NAO_w	Атмосферные осадки, мм	Температура воздуха зимой, °С
2011	37,0	199,3	–5,19	–0,18	281	–12,7
2012	42,4	242,0	4,81	1,59	286	–10,4
2013	57,6	272,8	–3,06	–0,10	263	–9,7
2014	54,8	227,0	0,81	1,63	236	–8,5
2015	39,3	204,0	2,89	3,11	191	–7,6
2016	51,7	266,5	3,77	1,70	196	–5,9
2017	45,9	287,5	1,34	1,48	243	–9,8
2018	57,6	271,7	0,46	3,02	262	–8,4
2019	44,5	235,3	3,10	0,88	143	–8,5
2020	57,3	299,1	–0,09	2,60	138	–3,5
2021	44,0	218,6	2,57	–0,97	113	–11,9
2022	38,0	204,4	–2,39	2,76	201	–7,0
2023	40,8	206,1	–1,79	2,17	306	–9,1
2024	39,4	235,0	–0,85	1,30	233	–10,7

Изменения зонального переноса в Северном полушарии в зимний сезон в основном следуют вариациям NAO[4], которые обусловливают скорость ветра и его направление, температуру воздуха и режим осадков над Европейским континентом [17]. Все эти факторы определяют гидрологический режим рек и водохранилищ.

В начале XXI в. в динамике годового индекса NAO наблюдалось два периода: снижение до 2010 г. и последующая тенденция к возрастанию [2]. С динамикой индекса согласуются изменения годового водного стока Волгоградского водохранилища: в 2001–2010 гг. отмечен отрицательный тренд (R^2 = 0,39), с 2011 по 2022 г. наблюдалось некоторое увеличение его объема [2]. Изменения зимнего притока и индекса NAO_o в исследуемый период показаны на рис. 1.

4 Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 124 с.

Наиболее тесная связь между этими показателями отмечена в 2016–2024 гг. с коэффициентом корреляции r = 0,89. Причиной нарушения синхронности колебаний показателей может быть антропогенный фактор – регулирование стока через гидротехническое сооружение (ГЭС).

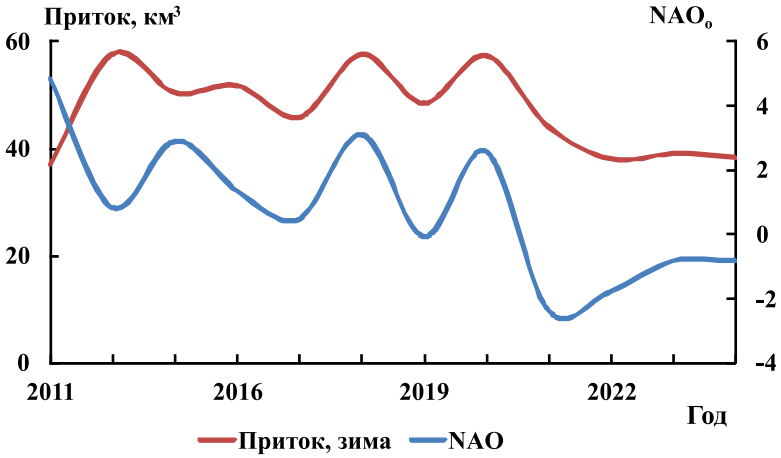


Рис. 1. Динамика объема зимнего притока воды к Волгоградскому водохранилищу и значений индекса NAO_o в период 2011–2024 гг.
Fig. 1. Dynamics of the volume of winter water inflow to the Volgograd Reservoir and the NAO_O index values in the period 2011–2024

Реакция среды pH, растворенный кислород, солевой состав

Реакция среды pH колебалась в интервале 6,9–8,6. Содержание растворенного кислорода изменялось от 7,6 до 12,6 мг/дм³. Более низкие концентрации O_2 отмечены на литоральных участках, в русловой части водохранилища значения элемента достигали 9,9–12,6 мг/дм³.

Минерализация воды Волгоградского водохранилища в зимний период колебалась от 315 до 402 мг/дм³, наблюдали некоторое повышение показателя за исследованный период (R^2 = 0,26 при p = 0,09). Доминирующими ионами, как и в вегетационный сезон, являлись гидрокарбонаты и кальций (табл. 2).

Концентрации ионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^- за исследуемый период колебались на одном уровне, в то время как в содержании суммы Na^+ и K^+ отмечен положительный тренд (R^2 = 0,35 при p = 0,04), а в динамике Cl^- и SO_4^{2-} наблюдали слабую тенденцию к повышению концентраций (R^2 = 0,19–0,22 при p = 0,12–0,16). Между величинами зимнего притока и содержанием сульфатов фиксировали отрицательную достоверную связь (r = –0,64 при p = 0,02). Причем максимальные концентрации сульфатов отмечены в 2023–2024 гг. и могли быть обусловлены увеличением количества осадков в стокообразующей зоне в предшествующий осенний период (табл. 1). Возможно, повышенные концентрации этого соединения связаны с антропогенным фактором. К подобному выводу пришел автор статьи [10] при исследовании зимнего режима Угличского водохранилища.

Таблица 2. Средние значения главных ионов (в мг*экв/дм^3) и минерализации (мг/дм^3) в воде Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 гг.
Table 2. Average values of major ions (in mg*eq/dm^3) and mineralization (mg/dm^3) in the water of the Volgograd Reservoir during the ice–covered periods of 2011–2024

Год исследования	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^+ + K^+$	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Минерализация
2011	3,03	1,09	0,75	2,68	0,76	1,43	350
2013	2,58	0,99	0,79	2,68	0,87	0,81	315
2014	3,15	1,55	0,17	3,00	0,84	1,03	349
2016	2,70	1,03	0,64	2,80	0,91	0,66	316
2017	3,46	1,03	0,95	3,13	0,92	1,39	394
2018	3,08	1,50	0,52	3,20	0,75	1,15	369
2019	3,00	1,14	1,16	3,10	0,90	1,25	382
2020	2,43	1,18	0,90	2,70	0,79	1,03	326
2021	2,80	1,70	0,45	3,00	1,18	0,77	349
2022	2,86	1,10	1,04	2,84	0,93	1,23	360
2023	2,87	1,07	1,65	2,84	0,95	1,80	402
2024	2,85	1,29	1,22	2,77	0,92	1,62	382

Органическое вещество

Значения цветности и перманганатной окисляемости (ПО) главным образом характеризуют органическое вещество (ОВ) аллохтонного происхождения. По величине бихроматной окисляемости (ХПК) судят о количестве общего ОВ. Показатель $БПК_5$ характеризует содержание легкоокисляемого ОВ. Величины исследованных показателей приведены в табл. 3.

В зимние периоды исследуемых лет показатели содержания общего и аллохтонного ОВ связаны между собой корреляционными отношениями: статистическая связь между ними колебалась от 0,71 до 0,76 ($p < 0,05$). Величина зимнего притока связана с показателями ПО, ХПК и цветности воды ($r = 0,56–0,75$ при $p = 0,01–0,04$). Связь между содержанием лабильного ОВ и объемом зимнего притока отсутствовала. Очевидно, ОВ в зимний период в основном представлено гуминовыми и фульвокислотами, поступающими с водосбора, а в балансе легкоокисляемого ОВ определенную роль играют антропогенные источники.

Экстремальные и средние концентрации показателей ОВ в зимний период выше, чем в вегетационный (табл. 3), что связано, очевидно, со спецификой ус-

ловий подледного периода: ограничение поступления кислорода и замедление окислительных процессов, низкая температура и снижение активности биоты.

Одним из последствий потепления климата выступает браунификация озер и рек, т. е. увеличение цветности воды в результате возрастания стока гумусовых веществ и связанного с ними железа [18]. Для Волгоградского водохранилища характерны невысокие значения цветности. Однако в отдельные годы повышенного притока в зимний период (2013, 2018, 2020 гг.) окраска воды возрастала до 50–61 градуса. Очевидно, что максимальные значения цветности связаны с увеличением доли стока с заболоченных водосборов Верхней Волги в годы высокой водности (2013, 2018) или с аномально теплой погодой зимы 2019–2020 гг., которая могла способствовать вымыванию гумуса из прибрежных почв и развитию биохимических процессов, не свойственных данному сезону.

Таблица 3. Содержание ОВ и биогенных элементов в зимние и вегетационные периоды 2011–2024 гг. (в числителе приведены пределы колебания, в знаменателе – среднее значение и его ошибка)
Table 3. Content of organic matter and biogenic elements in the winter and growing seasons of 2011–2024. (the numerator shows the range of fluctuations, and the denominator shows the average value and its error)

Показатель	Зимний период	Вегетационный период*
Цветность, градусы	$\frac{20-61}{36\pm4}$	$\frac{21-37}{29\pm2}$
ПО, мгО/дм^3	$\frac{6,7-13,4}{8,8\pm0,6}$	$\frac{5,6-8,5}{7,3\pm0,3}$
ХПК, мгО/дм^3	$\frac{20-46}{32\pm2}$	$\frac{21-40}{26\pm1}$
$БПК_5$, мгO_2/дм^3	$\frac{0,6-4,7}{2,6\pm0,3}$	$\frac{1,5-3,1}{2,1\pm0,2}$
$N–NH_4$, мг/дм^3	$\frac{<0,02-0,47}{0,17\pm0,03}$	$\frac{0,11-0,29}{0,18\pm0,02}$
$N–NO_3$, мг/дм^3	$\frac{0,46-0,97}{0,65\pm0,04}$	$\frac{0,16-0,94}{0,40\pm0,03}$
$P–PO_4$, мг/дм^3	$\frac{0,018-0,10}{0,067\pm0,006}$	$\frac{0,024-0,084}{0,050\pm0,005}$
Si, мг/дм^3	$\frac{2,8-5,8}{3,7\pm0,2}$	$\frac{2,9-3,6}{3,3\pm0,1}$
Fe, мг/дм^3	$\frac{0,14-0,46}{0,26\pm0,03}$	$\frac{0,14-0,26}{0,22\pm0,01}$

Примечание: * – по [1, 3].

Биогенные элементы

С объемом водного притока в зимний период статистически связано содержание аммония, нитратов и железа (r = 0,66–0,80 при p = 0,00–0,03). Снижение водности в зимние периоды исследуемых лет, очевидно, явилось причиной отрицательного тренда этих элементов (рис. 2).

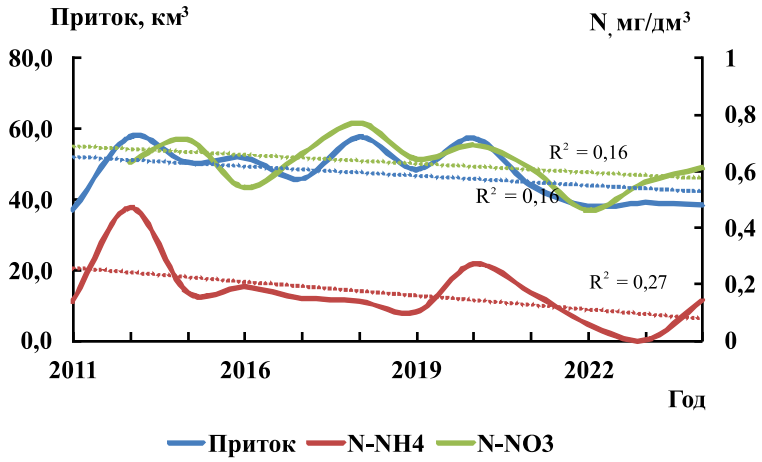


Рис. 2. Динамика притока и соединений азота в воде Волгоградского водохранилища в зимние периоды 2011–2024 гг. (пунктирными линиями показаны основные тенденции изменения показателей)

Fig. 2. Dynamics of the inflow and nitrogen compounds in the water of the Volgograd Reservoir in the winter periods of 2011–2024 (the dotted lines show the main trends in the change of indicators)

Максимальные и средние концентрации минерального фосфора в зимний период выше, чем в вегетационный (табл. 3), когда элемент активно расходуется при биопродукционных процессах. Сезонная динамика фосфатов характеризовалась увеличением концентраций элемента к осени [3], так что его максимальные значения в зимний период могут быть обусловлены накоплением за вегетационный. В вегетационный сезон выявлено также согласованное изменение трендов динамики годового индекса NAO и минерального фосфора [1]. Как в зимний период, так и в вегетационный не отмечено корреляционных отношений фосфатов с другими элементами, соединениями или гидрологическими характеристиками.

Статистическая связь межгодовой динамики содержания фосфатов в зимние периоды исследуемых лет и индекса NAO_o приближается к достоверному уровню ($r = 0,57$ при $p = 0,07$). Количественные показатели минерального фосфора зимой в воде Волгоградского водохранилища определяются водностью не только зимнего сезона, но и предшествующего осеннего, что обусловливает достоверную статистическую связь между суммарным притоком за эти периоды и содержанием этого элемента ($r = 0,61$, $p = 0,05$). Таким образом, с определенной долей вероятности можно предположить, что на содержание фосфора влияют не только гидрологические, но и метеорологические факторы, маркером которых является индекс NAO.

Среднее содержание железа и кремния, вторых по значимости для биологической продуктивности биогенных элементов, в зимние периоды исследуемых лет колебалось в пределах 0,14–0,46 и 2,8–5,8 мг/дм³ соответственно (табл. 3). Максимальные концентрации железа отмечены в годы наибольше-

го зимнего притока (2013, 2020). Динамика железа связана с колебаниями цветности как в зимний период (r = 0,81, p = 0,001) (рис. 3), так и в вегетационный (r = 0,86 при p = 0,02) [3]. В последние десятилетия увеличение концентрации железа отмечается в водных объектах, расположенных на заболоченных территориях северных регионов мира, где с водосбора в водотоки и водоемы поступает большое количество ОВ гумусовой природы [18]. Содержание кремния изменялось в узких пределах, достоверных связей с исследованными гидрохимическими и гидрологическими показателями не обнаружено.

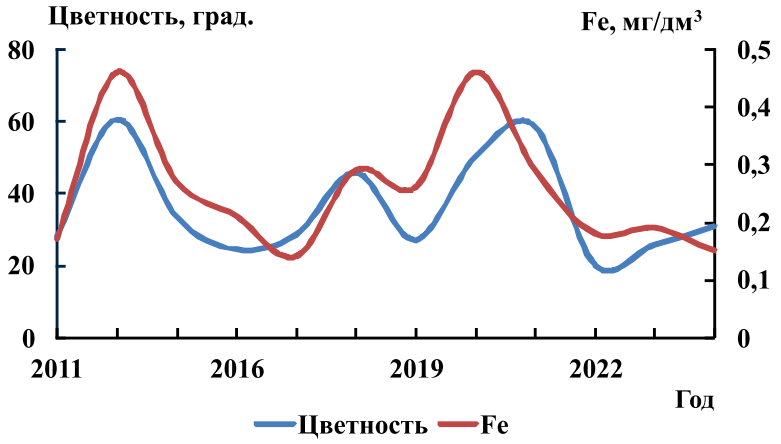


Рис. 3. Динамика железа и цветности в воде Волгоградского водохранилища в зимние периоды 2011–2024 гг.
Fig. 3. Dynamics of iron and coloration in the water of the Volgograd Reservoir in the winter periods of 2011–2024

Для определения структуры взаимосвязи между полученными гидрохимическими показателями применили метод главных компонент. По итогам анализа были отобраны две первые компоненты, учитывающие 74,5 % изменчивости исходных показателей.

Итоговая матрица факторных нагрузок дает представление о структурной организации исходных гидрохимических показателей и степени их связи с тем или иным главным фактором (компонентой). Первый фактор, определяющий 55,8 % дисперсии, свидетельствует о согласованной динамике показателей цветности, минерального азота, железа и объема водного притока (табл. 4). Совершенно независимо от указанных показателей происходят изменения содержания минерального фосфора, который совместно со значениями индекса NAO_o оказался во второй компоненте, вбирающей в себя 18,7 % вариабельности исходной информации. В этой связи можно предположить, что межгодовая динамика фосфатов более специфична и определяется иными механизмами в отличие от предыдущей группы показателей.

Таблица 4. Матрица факторных нагрузок гидрохимических показателей Волгоградского водохранилища, метеорологических и гидрологических факторов (жирным шрифтом выделены значимые нагрузки)

Table 4. Matrix of factor loads of hydrochemical indicators of the Volgograd reservoir, meteorological and hydrological factors (significant loads are highlighted in bold)

Показатель	Главные факторы	
	1	2
Зимний приток, км^3	**0,97**	0,13
Цветность, град.	**0,73**	0,59
Азот минеральный, мг/дм^3	**0,94**	–0,12
Фосфор минеральный, мг/дм^3	–0,14	**0,73**
Кремний, мг/дм^3	0,57	–0,38
Железо, мг/дм^3	**0,86**	–0,27
Индекс NAO_o	–0,03	**0,80**

ВЫВОДЫ

Таким образом, несмотря на то что Волжский каскад представляет собой цепь искусственных водоемов, простирающуюся на многие тысячи километров, существенное влияние на формирование гидрохимического режима водохранилищ Нижней Волги могут оказывать условия в верховьях каскада и в стокообразующей зоне. Динамика аллохтонного ОВ, железа и соединений минерального азота тесно связана с водностью в зимний период. Изменения концентрации минерального фосфора не согласуются с другими гидрохимическими показателями, что, вероятно, свидетельствует о еще более выраженной специфике его генезиса в экосистеме водохранилища.

Полученные зависимости, описывающие влияние водного притока на гидрохимические компоненты Волгоградского водохранилища, позволят прогнозировать содержание тех или иных ингредиентов в связи с динамикой водного баланса, а также с изменениями индекса NAO – маркера глобальных атмосферных процессов. Прогнозирование содержания органических и биогенных веществ, определяющих трофику водной экосистемы, может предоставить возможность управления состоянием экосистемы, основанного на приемах регулирования важнейших элементов гидрологического режима.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов с кем-либо.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллегам Саратовского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» И. Г. Филимоновой, Л. В. Гришиной и М. А. Сивущиной за активное участие в обработке гидрохимического материала.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the colleagues from the "VNIRO" Saratov branch: I. G. Filimonova, L. V. Grishina and M. A. Sivushchina for their active participation in the hydrochemical material processing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашуловская Е. А., Мосияш С. А. Биогенные элементы в водохранилищах Нижней Волги в начале XXI века // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды IX Всероссийской научно–практической конференции с международным участием. Т. 2. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. С. 154–158.
2. Шашуловская Е. А., Мосияш С. А. Межгодовые изменения содержания органического вещества и биогенных элементов в водохранилищах Нижней Волги: влияние климатической трансформации // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 83–100. https://doi.org/10.35567/19994508–2024–3–83–100
3. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. and Dalechina I. N. Long-Term Changes in the Main Indicators of the Trophic State of the Large Plain Reservoir under the Influence of Climatic Transformation and Successional Processes // Inland Water Biology. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 627–637. https://doi.org/10.1134/S1995082921060110
4. Wrzesiński D., Ptak M., Baczyńska F. Effect of the North Atlantic Oscillation on Ice Phenomena on Selected Lakes in Poland Over the Years 1961–2010 // Quaestiones Geographicae. 2013. Vol. 32 (3). P. 119–128. https://doi.org/10.2478/QUAGEO-2013-0020
5. Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Маммарелла И., Ояла А., Хейсканен Ю., Тержевик А. Ю. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149. № 6. С. 59–74.
6. Варенцова Н. А., Киреева М. Б., Фролова Н. Л., Харламов М. А., Илич В. П., Сазонов А. А. Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 694–709. https://doi.org/10.31857/S0321059620060152
7. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 6. С. 888–899. https://doi.org/10.31857/S2587556621060078
8. Речкалов В. В., Захаров С. Г., Сайфуллина И. Т. Распределение кислорода в толще воды озера Смолино в подлёдный период // Вестник Челябинского государственного университета. 2010. № 8 (189). С. 72–76.
9. Раднаева Л. Д., Ширеторова В. Г., Цыбекмитова Г. Ц., Павлов И. А., Андреев С. Г., Пинтаева Е. Ц., Гармаев Е. Ж., Тулохонов А. К. Особенности макро- и микроэлементного состава и пигментных характеристик планктонных водорослей озера Гусиное в подледный период // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2018. № 4. С. 13–25.

10. Григорьева И. Л. Закономерности и факторы формирования зимнего гидрохимического режима Угличского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 52–64. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-2-4
11. Томберг И. В., Синюкович В. Н., Сороковикова Л. М., Раднаева Л. Д., Павлов И. А., Ширеторова В. Г., Чернышов М. С., Тулохонов А. К. Особенности химического состава вод реки Селенги в период зимней межени 2017–2018 года // География и природные ресурсы. 2020. № 3. Т. 162. С. 81–88.
12. Григорьева И. Л., Кузовлев В. В. Особенности зимнего гидрохимического режима Иваньковского водохранилища в многолетнем аспекте // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2021. Т. 33. № 1. С. 14–24.
13. Калинин В. Г. Водный режим камских водохранилищ и рек их водосбора в зимний сезон. Пермь, 2014. 184 с.
14. Попова В. В., Георгиади А. Г. Спектральные оценки связи изменчивости стока Волги и североатлантического колебания в 1882–2007 гг. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 2. С. 47–59. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59
15. Шашуловский В. А., Мосияш С. С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 250 с.
16. Джамалов Р. Г., Сафронова Т. И., Телегина Е. А. Внутригодовое распределение стока рек с оценкой роли зимней межени // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 6. С. 603–611. https://doi.org/10.7868/S0321059617060049
17. Данилович И. С., Вжезински Д., Лопух П. С., Некрасова Л. А. Влияние североатлантического колебания на сток рек Беларуси // Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География. 2007. № 3. С. 100–104.
18. Назарова Л. Е., Исакова К. В., Калинкина Н. М., Балаганский А. Ф. Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Известия Русского географического общества. 2022. Т. 154. № 1. С. 28–36. https://doi.org/10.31857/S0869607122010086

REFERENCES

1. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. Biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga at the beginning of the XXI century / Modern problems of reservoirs and their catchments: proceedings of the IX All–Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Vol. 2. Perm: Perm State National Research University, 2023. P. 154–158 (in Russian).
2. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. Interannual changes in the content of organic matter and biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga: the impact of climatic transformation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 83–100 (in Russian). https://doi.org/10.35567/19994508–2024–3–83–100
3. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. and Dalechina I. N. Long-Term Changes in the Main Indicators of the Trophic State of the Large Plain Reservoir under the Influence of Climatic Transformation and Successional Processes. *Inland Water Biology*. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 627–637. https://doi.org/10.1134/S1995082921060110
4. Wrzesiński D., Ptak M., Baczyńska F. Effect of the North Atlantic Oscillation on Ice Phenomena on Selected Lakes in Poland Over the Years 1961–2010. *Quaestiones Geographicae*. 2013. Vol. 32 (3). P. 119–128. https://doi.org/10.2478/QUAGEO-2013-0020
5. Zdorovennova G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen Yu., Terzhevik A. Yu. Evolution of the water column temperature in boreal lakes

against the background of regional climate changes. *Newsletters of the Russian Geographical Society*. 2017. Vol. 149. No. 6. P. 59–74 (in Russian).

6. Varentsova N. A., Kireeva M. B., Frolova N. L., Kharlamov M. A., Ilich V. P., Sazonov A. A. Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood undercurrent climate conditions: problems and reproducibility. *Water resources.* 2020. Vol. 47. No. 6. P. 953–967. (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0321059620060152
7. Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Palshin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Zdorovennov R. E., Smirnova V. S. The reaction of the ecosystem of Lake Onega in the spring and summer period to the abnormally high air temperature in winter 2019/2020. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series: Geography*. 2021. Vol. 85. No. 6. P. 888–899 (in Russian). https://doi.org/10.31857/S2587556621060078
8. Rechkalov V. V., Zakharov S. G., Saifullina I. T. Distribution of oxygen in the water column of Lake Smolino during the subglacial period. *Bulletin of the Chelyabinsk State University*. 2010. No. 8 (189). P. 72–76 (in Russian).
9. Radnaeva L. D., Shiretorova V. G., Tsybekmitova G. Ts., Pavlov I. A., Andreev S. G., Pintaeva E. Ts., Garmaev E. Zh., Tulokhonov A. K. Features of macro- and microelement composition and pigment characteristics of planktonic algae of Lake Gusinoe during the ice-covered period. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2018. No. 4. P. 13–25 (in Russian).
10. Grigorieva I. L. Patterns and factors of formation of the winter hydro/chemical regime of the Uglich reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020. No. 2. P. 52–64 (in Russian). https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-2-4
11. Tomberg I. V., Sinyukovich V. N., Sorokovikova L. M., Radnaeva L. D., Pavlov I. A., Shiretorova V. G., Chernyshov M. S., Tulokhonov A. K. Features of the Chemical Composition of the Selenga River Waters during the Winter Low Water Period of 2017–2018. *Geography and Natural Resources*. 2020. No. 3. Vol. 162. P. 81–88 (in Russian).
12. Grigorieva I. L., Kuzovlev V. V. Features of the winter hydro/chemical regime of the Ivankovo reservoir in the long–term aspect. *Bulletin of Tver State University. Series: Geography and Geo/ecology*. 2021. Vol. 33. No. 1. P. 14–24 (in Russian).
13. Kalinin V. G. Water regime of the Kama reservoirs and their catchment rivers in the winter season. Perm, 2014. 184 p. (in Russian).
14. Popova V. V., Georgiadi A. G. Spectral estimates of the relationship between the variability of the Volga runoff and the North Atlantic oscillation in 1882–2007. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series: Geography*. 2017. No. 2. P. 47–59 (in Russian). https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59
15. Shashulovsky V. A., Mosiyash S. S. Formation of biological resources of the Volgograd reservoir during the succession of its ecosystem. M.: Association of Scientific publications of the KMC, 2010. 250 p. (in Russian).
16. Jamalov R. G., Safronova T. I., Telegina E. A. Annual distribution of river runoff with estimated contribution of winter low–water season. *Water resources*. 2017. Vol. 44. No. 6. P. 785–792. https://doi.org/10.7868/S0321059617060049
17. Danilovich I. S., Vrzhesinski D., Lopukh P. S., Nekrasova L. A. Influence of the North Atlantic Oscillation on the Flow of Belarusian Rivers. *Newsletters of BSU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography.* 2007. No. 3. P. 100–104 (in Russian).
18. Nazarova L. E., Isakova K. V., Kalinkina N. M., Balagansky A. F. The influence of climate warming on the winter flow of the Shuya River and the consequences for the zoobenthos of Lake Onega. *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2022. Vol. 154. No. 1. P. 28–36 (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0869607122010086

Сведения об авторах:

Шашуловская Елена Александровна, канд. биол. наук, заведующий лабораторией рыбохозяйственной экологии Саратовского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «Всероссийский научно–исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; https://orcid.org/0000–0003–1072–7046; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Мосияш Светлана Александровна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории рыбохозяйственной экологии Саратовского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «Всероссийский научно–исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; https://orcid.org/0000–0003–0875–6358; e-mail: mosiyashsa@yandex.ru

About the authors:

Elena A. Shashulovskaya, Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Fisheries Ecology of the Saratov Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography, 152 Chernyshevsky str., Saratov, 410002, Russia; https://orcid.org/0000–0003–1072–7046; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Svetlana A. Mosiyash, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, the Laboratory of Fisheries Ecology of the Saratov Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography, 152 Chernyshevsky str., Saratov, 410002, Russia; https://orcid.org/0000–0003–0875–6358; e-mail: mosiyashsa@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 07.11.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 16.01.2026.
Принята к публикации / Accepted 22.01.2026.

УДК 528.88; 556 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-109-122*

Оригинальная статья/Original paper

Мониторинг уровня воды озера Сарыкамыш на основе данных дистанционного зондирования Земли

С. Б. Калабаев

salauat.kalabaev@gmail.com

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Ташкент, Республика Узбекистан
Ташкентский государственный аграрный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Озера и происходящие в них гидрологические процессы являются важными индикаторами глобальных экологических и климатических преобразований. Изменения уровня и объема воды в озерах тесно связаны не только с природными факторами (осадками, испарением, температурным режимом), но и с антропогенной деятельностью. Поэтому регулярный мониторинг динамики уровня воды в озерах имеет важное значение для эффективного управления водными ресурсами, совершенствования региональных климатических моделей и оценки экологических рисков. **Методы.** В настоящем исследовании проанализированы изменения уровня воды оз. Сарыкамыш, расположенного на границе Узбекистана и Туркменистана, на основе данных спутниковой альтиметрии TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 и Sentinel-3 за период 2001–2024 гг. **Результаты.** Согласно этому анализу, средний рост уровня воды в оз. Сарыкамыш составляет +0,16 м/год. Мониторинг альтиметрических данных составляет научную базу для более глубокого понимания гидрологического режима оз. Сарыкамыш, создания надежной основы для долгосрочного прогноза изменений уровня воды и формирования стратегий управления водными ресурсами в Приаралье.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: озеро Сарыкамыш, уровень воды, альтиметрия, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, Sentinel-3

Для цитирования: Калабаев С. Б. Мониторинг уровня воды озера Сарыкамыш на основе данных дистанционного зондирования Земли // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 109–122. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-109-122; EDN: JIHYTM

© Калабаев С. Б., 2026

Monitoring of water level of Lake Sarygamysh based on Earth remote sensing data

Salauat B. Kalabaev

salauat.kalabaev@gmail.com

Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan
Tashkent State Agrarian University, Tashkent, Uzbekistan

ABSTRACT

Relevance. Lakes and the hydrological processes occurring within them are important indicators of global environmental and climatic transformations. Changes in lake water level and volume are closely linked not only to natural factors (precipitation, evaporation, temperature regime) but also to anthropogenic activities. Therefore, regular monitoring of lake water level dynamics is essential for effective water resources management, improvement of regional climate models, and assessment of environmental risks. **Methods.** This study analyzes changes in the water level of Lake Sarygamysh, located on the border between Uzbekistan and Turkmenistan, using satellite altimetry data from TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, and Sentinel-3 for the period 2001–2024. **Results.** According to the analysis, the average rate of water level rise in Lake Sarygamysh is +0.16 m/year. Monitoring based on altimetric data provides a scientific foundation for a deeper understanding of the hydrological regime of Lake Sarygamysh, establishes a reliable basis for long-term forecasting of water level changes, and supports the development of water resources management strategies in the Aral Sea region.

KEYWORDS: Lake Sarygamysh, water level, altimetry, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, Sentinel-3

For citation: Kalabaev S. B. Monitoring of water level of Lake Sarygamysh based on Earth remote sensing data. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 1. P. 109–122. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-109; EDN: JIHYTM

ВВЕДЕНИЕ

Озера играют важную роль в водном балансе Земли, климате и локальном экологическом равновесии. Через изменения своего уровня они отражают не только природные процессы, но и влияние антропогенных факторов. Поэтому регулярный мониторинг уровня озер необходим для управления водными ресурсами, оценки изменения климата и гидрологического моделирования. Однако нехватка традиционных наблюдательных станций, их неравномерное географическое распределение и отсутствие в удаленных регионах затрудняют получение достоверных данных для многих озер.

Альтиметрические данные широко используются не только для определения изменений уровня озер, но и для оценки динамики объема воды, калибровки гидрологических моделей и анализа влияния изменения климата на водные ресурсы. Вместе с тем такие проблемы, как сложности обработки альтиметрических данных, влияние прибрежных зон, фильтрация шумов и повышение точности измерений, по-прежнему находятся в центре внимания исследователей. Таким образом, спутниковая альтиметрия приобретает важное научное

и практическое значение как современный, надежный и глобально применимый метод определения уровня озер, дополняющий, а в некоторых случаях и заменяющий традиционные гидрометрические наблюдения.

В последние годы глобальное потепление климата, диспропорции в режиме осадков и температуры, а также расширение гидротехнических сооружений, оросительных систем и коллекторно-дренажных сетей в результате деятельности человека оказывают значительное влияние на гидрологический режим озер. Эти процессы ярко проявляются в таких явлениях, как сокращение Аральского моря и, напротив, наполнение оз. Сарыкамыш.

Оз. Сарыкамыш является одним из крупнейших равнинных озер Средней Азии, расположено на границе Узбекистана и Туркменистана, в примыкающей к чинку части плато Устюрт. В формировании современной котловины озера важную роль сыграли процессы водной эрозии, водной аккумуляции, дефляции и суффозии. Бассейн Сарыкамыша характеризуется низменностями и принадлежит к системе замкнутого накопления воды, отличаясь карстовым рельефом, склонами крутизной до 100 м и солеными болотами [1]. Площадь водосбора ограничена на севере и северо-западе плато Устюрт, на северо-востоке и востоке – Туранской равниной, на юге – пустыней Каракумы (рис. 1).

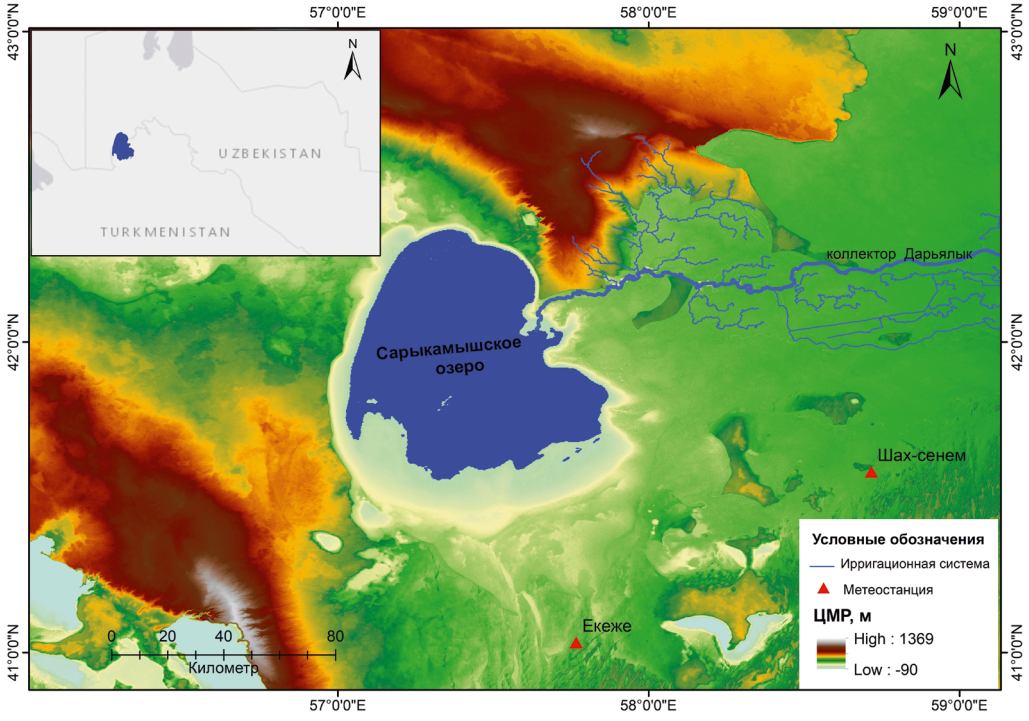


Рис. 1. Географическое положение оз. Сарыкамыш
Fig. 1. Geographical location of Lake Sarygamysh

В исторические периоды воды Амударьи неоднократно заполняли Сарыкамышскую котловину, случались подъемы уровня озера, а впоследствии, в результате изменения русла реки, его высыхание. В отдельные периоды воды Амударьи переливались из оз. Сарыкамыш и стекали в Каспийское море по руслу Узбоя. По данным А. В. Шпитникова (1969 г.), в результате поступления вод Амударьи в Сарыкамышскую котловину уровень озера поднимался на 3–8 м, и такие события наблюдались в 1878, 1889, 1896, 1921 и 1934 годах. К середине 1960-х годов высохшая котловина озера была покрыта мощным слоем соли, лишь в отдельных понижениях сохранились участки соленой воды, подпитываемые грунтовыми водами [1, 2].

Гидрологический режим оз. Сарыкамыш в течение длительного времени оставался недостаточно изученным. Первоначальные данные по этому вопросу были собраны экспедициями института «Киевгидропроект» (1971 г.), Туркменского УГМ (1976, 1985 гг.) и САНИГМИ (1980–1985 гг.). В дальнейшем состояние и гидрологическая динамика озера изучались также Министерством водного хозяйства СССР. В последние годы современное состояние оз. Сарыкамыш проанализировано А. Г. Костяным, С. А. Лебедевым, И. С. Зонном, О. Ю. Лавровой и Д. М. Соловьевым (2011 г.) с использованием спутниковых снимков [3–5].

Основной целью данного исследования является мониторинг динамики уровня воды – одного из гидрологических параметров оз. Сарыкамыш – методами дистанционного зондирования, в частности на основе данных спутниковой альтиметрии.

Научные задачи исследования заключаются в следующем:

– формирование базы данных по уровню воды оз. Сарыкамыш на основе измерений спутниковой альтиметрии;

– заполнение пропусков в наборе данных временных рядов с помощью методов интерполяции;

– статистический анализ многолетних тенденций изменения уровня воды в озере.

Результаты данного исследования создают важную научную основу для более глубокого изучения гидрологического режима оз. Сарыкамыш и совершенствования мониторинга водных ресурсов.

Объектом исследования является оз. Сарыкамыш, предметом – определение уровня воды озера на основе данных дистанционного зондирования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Развитие технологий спутниковой альтиметрии в последние годы создало новые возможности для определения уровня воды. Благодаря радиолокационным и лазерным альтиметрическим миссиям, таким как TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, CryoSat-2, Sentinel-3, ICESat-2, определяется уровень водных объектов на поверхности Земли и формируются долгосрочные данные по уровню

воды для многих озер. Основными преимуществами этого метода являются глобальный охват, регулярная частота наблюдений и возможность получения длительных исторических данных.

За последние двадцать лет объем и качество данных, полученных со спутников для определения уровня воды крупных озер и водных бассейнов, значительно выросли. Гидрологический режим озер и рек Южной Америки, Африки и Сибири успешно изучался с использованием данных спутниковой альтиметрии [6, 7]. Уровень воды в нижнем течении р. Волги [8], в каскаде Волжских водохранилищ, а также в озерах Ильмень и Ладога, расположенных на границе России и Эстонии, исследовали с использованием спутниковых альтиметрических измерений [9].

При определении высоты по спутниковым данным первоначально измеряется время прохождения T радиоимпульса от момента излучения до возвращения. Оно умножается на скорость распространения радиоимпульса, равную скорости света ($c \approx 3\times10^8$ м/с), и находится высота диапазона R (дальность), которая вычисляется следующим образом [3, 7]:

$$R = T \times c. \quad (1)$$

Высота поверхности находится как разность высоты альтиметра и высоты диапазона по выражению:

$$h = H - R, \quad (2)$$

где h – высота поверхности относительно эллипсоида, м;

H – высота космического аппарата относительно эллипсоида, м;

R – высота космического аппарата относительно поверхности, м.

Уровень воды рассчитывается относительно геоида. Геоид – это эквипотенциальная поверхность Земли, которая совпадает со средним уровнем моря над океанами и гипотетически расположена под всеми поверхностями суши. Эллипсоид –геометрическая фигура, близкая к форме поверхности Земли.

Однако в определенную высоту необходимо ввести некоторые поправки, учитывающие такие факторы, как атмосферное давление и влияние электронов в ионосфере, волнение водной поверхности и др. (рис. 2). После введения поправок приведенное выше выражение можно записать следующим образом:

$$h = H - R - hT - h_{ион} - h_{инст} - h_г, \quad (3)$$

где h_T – поправка, зависящая от влажности и давления в тропосфере;

$h_{ион}$ – поправка, зависящая от электронов в ионосфере;

$h_{инст}$ – инструментальная поправка;

$h_г$ – поправка на геоид.

В целом, альтиметрический радар способен точно измерять уровень воды в идеальных условиях, т. е. при отсутствии влажности и давления в тропосфере, электронов в ионосфере и вертикального движения Земли.

Альтиметрический радар обладает такими преимуществами, как нечувствительность к облакам или туману, возможность проведения измерений практически в любой точке мира, получение данных практически в реальном времени, высокая точность продукции, а также наличие непрерывной серии данных с октября 1992 г. С начала 1990-х годов постоянно осуществляются измерения с помощью спутниковых радиолокационных альтиметров серий ERS-1/2 (European Remote Sensing Satellite), Envisat (Environmental Satellite) и Saral (Satellite with ARgos and Altika), а также Topex/Poseidon (Topographic Experiment), Jason-1/2/3 (Joint Altimetry Satellite Oceanography Network), GFO (Geosat Follow-On), HY-2A (Haiyang) и CryoSat-2 [3, 10, 11].

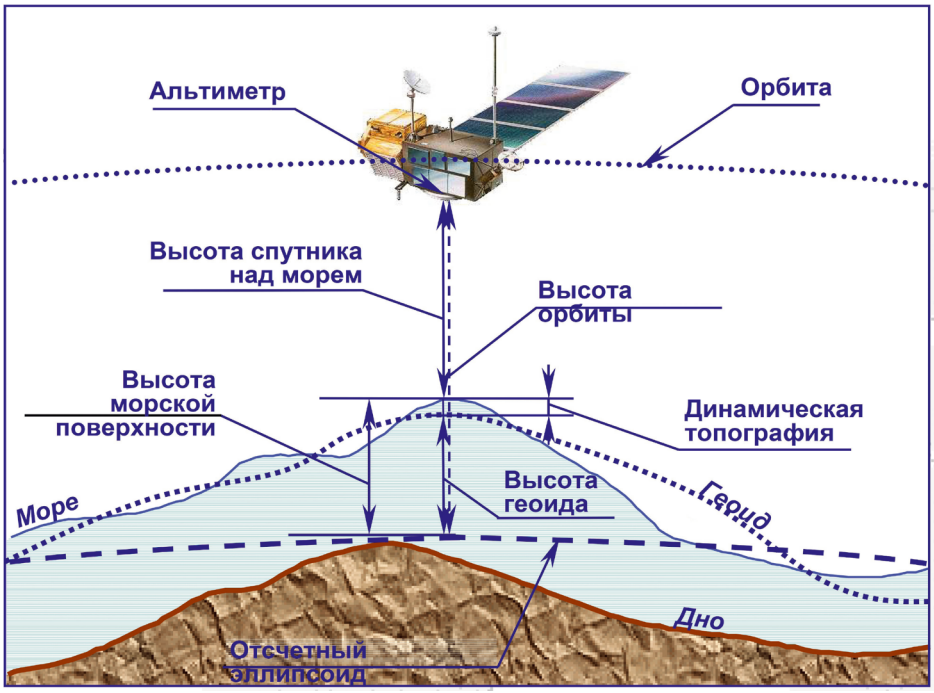


Рис. 2. Принципы измерения высоты (С. А. Лебедев, 2006 г.)
Fig. 2. Principles of height measurement (S. A. Lebedev, 2006 г.)

Sentinel-3 является одной из альтиметрических миссий нового поколения, предназначенных для долгосрочных наблюдений, его первый спутник Sentinel-3A был выведен на орбиту в феврале 2016 г. Во всех альтиметрических миссиях измерения проводятся только в надирном направлении, т. е. по вертикальным точкам непосредственно под спутником. По этой причине их пространственное покрытие ограниченно, что является одним из основных недостатков этих наблюдений [12].

Альтиметрические данные представляются с задержкой на 2–24 ч, а в некоторых случаях – до 30–75 сут, в зависимости от уровня их обработки [3]. Для гидрологических анализов альтиметрические данные делятся на две основные категории: GDR (Geophysical Data Records) и SGDR (Sensor Geophysical Data Records). Этот набор данных включает все геофизические параметры, необходимые для расчета уровня воды для каждого сегмента трассы. В настоящее время они представляются в стандартизированном формате NetCDF (Network Common Data Form).

В данном исследовании для определения высоты уровня воды оз. Сарыкамыш использовался архивный набор измерений за период 2001–2024 гг. из специализированной базы данных G-REALM (Global Reservoirs and Lakes Monitor).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам исследования, в базе данных G-REALM за период 2001–2024 гг. имеются регулярные данные наблюдений за уровнем воды оз. Сарыкамыш с 10-дневными интервалами (рис. 3). Таким образом, в данном исследовании альтиметрические данные были загружены из базы G-REALM в формате NetCDF для оценки высоты уровня воды.

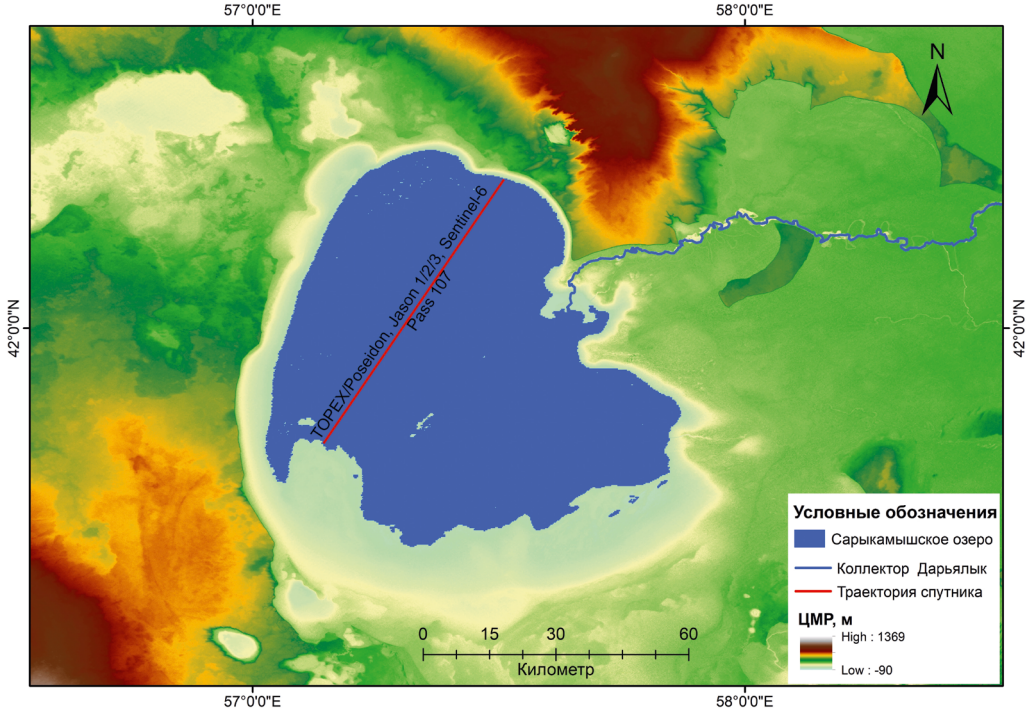


Рис. 3. Траектории спутников-альтиметров TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 и Sentinel-6
Fig. 3. Satellite altimeter tracks for TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, and Sentinel-6

В настоящее время точность спутниковых альтиметрических измерений значительно возросла по сравнению с радиовысотомерами первого поколения. Миссии TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 и Sentinel-6 оснащены высокоточными радиолокационными альтиметрическими системами, общей особенностью которых является работа на орбите с коротким (10-дневным) циклом повторения (рис. 4).

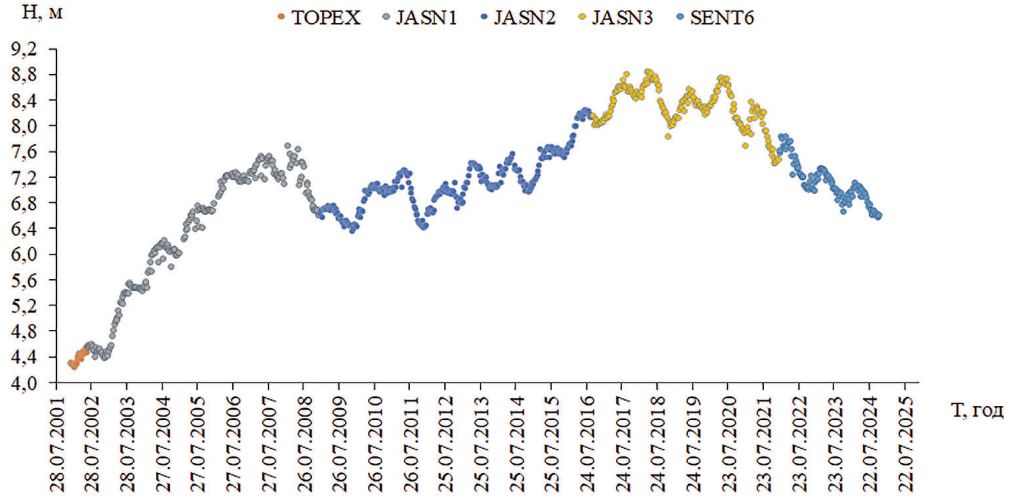


Рис. 4. Значения уровня воды в оз. Сарыкамыш, определенные с помощью различных альтиметров
Fig. 4. Water level values of Lake Sarygamysh derived from different altimeters

В долгосрочных спутниковых рядах наблюдений иногда встречаются разрывы или пропуски в данных. В таких случаях для восстановления данных были опробованы методы линейной интерполяции, k-ближайших соседей, по-

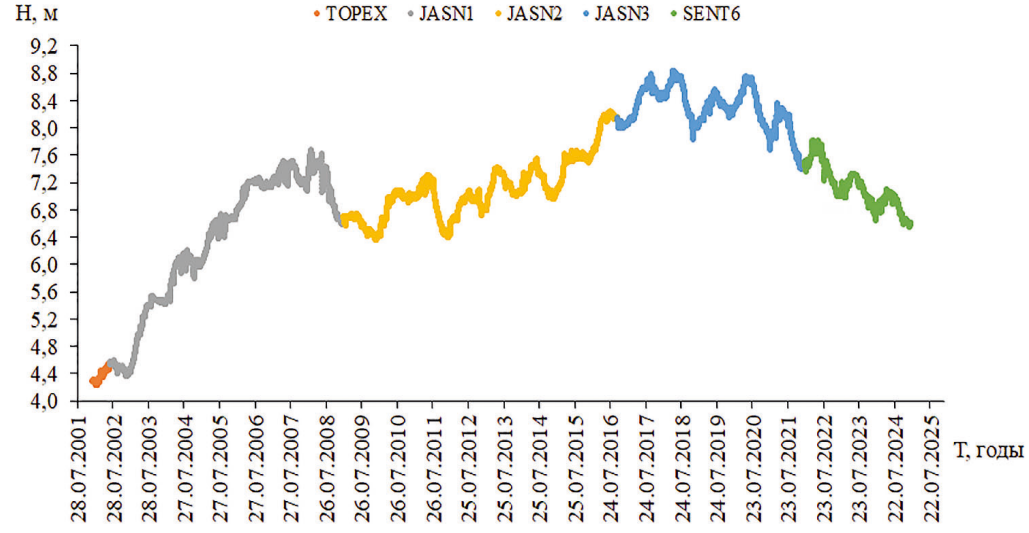


Рис. 5. Восстановленные значения уровня воды озера Сарыкамыш
Fig. 5. Reconstructed water level values of Lake Sarygamysh

линомиальной интерполяции 2-го и 3-го порядка, кусочно-кубической интерполяции Эрмита.

Согласно результатам предыдущих исследований, метод линейной интерполяции дает наиболее приемлемые результаты для заполнения пропусков в рядах спутниковых альтиметрических данных [3]. Пропуски в альтиметрических данных были заполнены с помощью метода линейной интерполяции (рис. 5).

В результате восстановлены ежедневные данные уровня воды в озере за 2001–2024 гг. Поскольку на территории озера отсутствуют данные in situ, возможности сравнения заполненных альтиметрических данных нет.

На следующем этапе исследования были рассчитаны статистические характеристики долгосрочных стандартных рядов, такие как среднее, максимальное, минимальное значения, стандартное отклонение и дисперсия (таблица).

Таблица. Статистическое описание серии спутниковых наблюдений
Table. Statistical description of the satellite observation series

Период	Тенденция	Статистический показатель	Значение, м	Время наблюдения
2001-2024	+0,16	σ	0,91	-
2002–2007	+0,56	s^2	0,82	-
2008–2009	–0,60	$H_{ср}$, m	7,12	2013
2010–2020	+0,15	$H_{макс}$, m	8,84	24–29.04.2018
2021–2024	–0,36	$H_{мин}$, m	4,23	07–09.02.2002

Примечание: σ – стандартное отклонение, s^2 – дисперсия, $H_{ср}$ – средняя высота уровня воды, $H_{макс}$ – максимальная высота уровня воды, $H_{мин}$ – минимальная высота уровня воды.

Согласно результатам статистического расчета восстановленных данных, самый низкий уровень воды в 2001–2024 гг. был зафиксирован 24–29 февраля 2002 г. и составил 4,23 м. Самый высокий уровень воды наблюдался 24–29 апреля 2018 г. – 8,84 м. Из анализа многолетних значений уровня воды выяснилось, что дисперсия составила 0,82 м, а значение среднего квадратического отклонения – 0,91 м. Изучение многолетних значений уровня воды Сарыкамыша за 2001–2024 гг. показало, что за этот период можно выделить четыре этапа (рис. 6).

Первый приходится на 2001–2007 гг. На этой стадии наблюдалась тенденция годового повышения уровня воды оз. Сарыкамыш, средняя скорость подъема составила +0,56 м/год. Гидрологический режим озера в этот период характеризовался в основном положительным водным балансом, что объясняется относительным увеличением притока воды в регион.

Второй этап охватывает 2008–2009 гг. и является более коротким по сравнению с другими стадиями. В эти годы проявилась тенденция к понижению

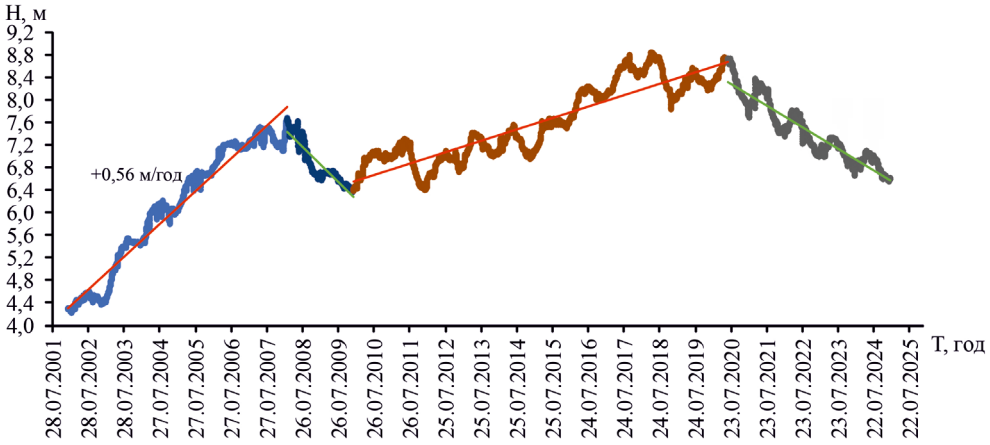


Рис. 6. Многолетняя изменчивость уровня воды оз. Сарыкамыш
Figure 6. Long-term water level variability of Lake Sarygamysh

уровня воды, средний показатель снижения составил –0,60 м/год. Такая ситуация связана с уменьшением объема стока, засушливыми климатическими условиями.

Третий этап, 2010–2020 гг., считается длительным и стабильным. В течение этого периода уровень воды вновь вернулся к тенденции роста, средняя годовая скорость повышения составила +0,15 м/год. Этот процесс объясняется относительным восстановлением баланса водных ресурсов, увеличением стока Амударьи и объема водозабора на орошение в Хорезмской и Ташаузской областях, а также улучшением региональных гидрологических условий.

На последнем этапе, 2021–2024 гг., уровень воды вновь перешел к тенденции снижения. Среднегодовая скорость снижения составила –0,36 м/год, что связано с наблюдаемым в последние годы в регионе потеплением климата, усилением процессов испарения и уменьшением речного стока. Таким образом, результаты анализа показывают, что динамика уровня воды оз. Сарыкамыш обладает пространственно-временной изменчивостью и развивается в различных направлениях под влиянием природных и антропогенных факторов. Однако в конце исследования, т. е. по окончании периода наблюдений, был отмечен положительный тренд повышения уровня воды по сравнению с началом периода.

Основным фактором, определяющим гидрологический режим оз. Сарыкамыш, является приток воды. По Дарьялыкскому коллектору в озеро ежегодно поступает приблизительно 3–5 км^3 воды [5]. В настоящее время получить достоверные наземные данные о расходе коллектора со стороны Туркменистана невозможно, поэтому изменения уровня воды в озере были статистически сопоставлены со среднегодовым расходом воды Амударьи на гидропосту Туя-Муюн. Результаты анализа показали низкий коэффициент корреляции (r = 0,43). Это объясняется тем, что сток коллектора формируется главным об-

разом за счет дренажно-возвратных вод орошаемых земель, а гидрологические режимы коллектора и реки существенно различаются.

Тем не менее, начиная с 2020 г. на фоне снижения водности Амударьи наблюдается понижение уровня воды и в озере, что указывает на наличие косвенного влияния речного стока на состояние озера.

Метеорологические факторы также играют важную роль в межгодовой изменчивости уровня воды (рис. 7.). Для оценки влияния метеорологических условий использованы данные ближайшей к озеру метеостанции Екеже. Согласно результатам статистического анализа атмосферных осадков и температуры воздуха, связь между уровнем воды и температурой воздуха оказалась весьма слабой (r = 0,36), тогда как с количеством осадков выявлена более значимая корреляция (r = 0,60).

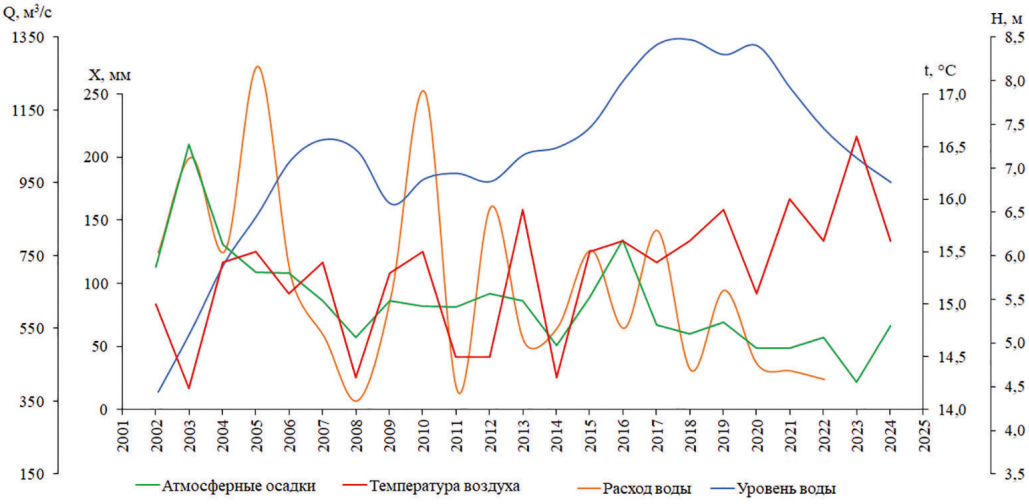


Рис. 7. График изменения уровня воды в сочетании с речным стоком и метеорологическими показателями
Fig. 7. Graph of water level changes in combination with river flow and meteorological indicators

Например, одним из периодов с наибольшим уровнем воды за последнее десятилетие был 2016 г., когда уровень озера составил 8,02 м. В этот же год количество атмосферных осадков достигло 134 мм, что примерно на 40 мм больше по сравнению с предыдущими годами. Это подтверждает, что количество осадков является важным метеорологическим фактором, влияющим на изменение уровня озера после притока.

В целом, начиная с 2020 г. наблюдается устойчивое снижение уровня воды в озере. Этот процесс объясняется, с одной стороны, уменьшением стока Амударьи и снижением количества атмосферных осадков по годам, а с другой – повышением температуры воздуха, приводящим к усилению процессов испарения.

ВЫВОДЫ

В результате анализа, основанного на альтиметрических данных за период 2001–2024 гг., было установлено, что динамика уровня воды оз. Сарыкамыш характеризовалась поэтапной изменчивостью. В течение периода исследования наблюдались тенденции как повышения, так и понижения уровня воды в несколько этапов, что объясняется взаимодействием природных и антропогенных факторов.

В первые годы уровень воды в озере находился в устойчивой тенденции роста под влиянием положительного водного баланса, впоследствии же наблюдалось снижение из-за засухи, уменьшения речного стока и увеличения испарения. Начиная с 2010-х годов уровень воды проявил тенденцию к повторному повышению благодаря относительному увеличению водопритока и улучшению гидрологических условий. Хотя в последние годы вновь было отмечено кратковременное снижение, в целом уровень воды завершил период со средним годовым повышением на +0,16 м/год.

Результаты исследования показывают, что начиная с 2020 г. в озере наблюдается устойчивая тенденция ежегодного снижения уровня воды. Эта динамика, в свою очередь, объясняется усиливающимся воздействием процессов изменения климата в регионе, уменьшением количества атмосферных осадков и ростом температуры воздуха. Если данная тенденция сохранится, продолжающееся понижение уровня воды может оказать негативное воздействие на само озеро и экологическое состояние прилегающей территории, привести к снижению разнообразия флоры и фауны, а также нарушению естественного баланса экосистем.

Мониторинг на основе альтиметрических данных открывает новые возможности для оценки долгосрочного гидрологического состояния оз. Сарыкамыш и совершенствования стратегий управления водными ресурсами.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аденбаев Б. Е., Калабаев С. Б. Гидрография, морфометрия и мониторинг современного состояния озера Джылтырбас // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 5. С. 43–53. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_5_4
2. Калабаев С. Б., Артыкова Ф. Я., Аденбаев Б. Е. Анализ долгосрочных тенденций осадков в Южном Приаралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 317–332. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-4-317-332
3. Артыкова Ф. Я., Калабаев С. Б. Перспективы использования спутниковых данных для определения уровня воды в крупных озерах // Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 251–259. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-4-251-259.
4. Артыкова Ф. Я., Калабаев С. Б. Долгосрочные фазовые изменения озер Южного Приаралья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление 2025. № 1. С. 40–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56
5. Калабаев С. Б., Йўлдошбаева М. Р. Қуйи Амударе сув объектларининг гидрографик тавсифи // Ўзбекистон География жамияти ахбороти. 2019. 56-жилд. Б. 235–239.
6. Kostianoy A. G., Kostianaia E. A., Lebedev S. A., Serykh I. V., Prokofiev Y. A. Interannual variability in the level of lakes in northwestern Russia / Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference “Fundamental and Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies”. Maykop State Technological University. Maykop, 17–21 May 2021. Part 1. P. 158–167.
7. Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Satellite Altimetry of the Caspian Sea / Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry. Venice. Italy. 13–18 March 2006. Vol. SP 614.
8. Troitskaya Y. I., Rybushkina G. V., Soustova I. A., Balandina G. N., Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Satellite altimetry of inland water bodies // Hydrophysical Processes. 2012. Vol. 39. P. 184–199.
9. Костяной А. Г., Лебедев С. А., Казьмина М. В., Цепелев В. Ю., Варлашина В. М., Нещадимова Г. Г. Спутниковый мониторинг трансграничных вод России и Эстонии. М.: Сигнал, 2012. 16 с.
10. Калабаев С. Б. Landsat тасвирлари ердамида ер усти сув объектлари чегарасини аниқлашда спектрал индекслардан фойдаланиш имкониятлари // Гидрометеорология ва атроф муҳит мониторинги. 2023. № 4. Б. 36–43.
11. Калабаев С. Б., Артикова Ф. Я. Сунъий йўлдош кузатув маълумотлари бўйича кўлларни хариталаш ва мониторинг қилиш // Гидрометеорология ва атроф-муҳит мониторинги. 2024. № 1. Б. 87–92.
12. Калабаев С. Б., Аденбаев Б. Е. Оценка изменений площадей водной поверхности озера Междуречье по спутниковым снимкам / Материалы международной научно-практической конференции «Роль современной геоинформационной картографии, методов и технологий дистанционного зондирования в географических исследованиях». Ташкент, 2024. С. 505–508.

REFERENCES

1. Adenbaev B. E., Kalabaev S. B. Hydrography, morphometry and monitoring of the current state of Lake Diltirvas. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 5. P. 43–53. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_5_4 (in Russian)
2. Kalabaev S. B., Artikova F. Ya., Adenbaev B.E. Analysis of long-term precipitation trends in the Southern Aral Sea region. *Current problems in remote sensing of the Earth from space.* 2025. Vol. 22. № 4. P. 317–332. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-4-317-332
3. Artikova F. Ya., Kalabaev S. B. Prospects for using satellite data to determine water levels in large lakes. *Current problems in remote sensing of the Earth from space.* 2024. Vol. 21. No. 4. P. 251–259. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-4-251-259.
4. Artikova F. Ya., Kalabaev S. B. Long-Term Phase Changes In The South Aral Sea Region Lakes. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 40–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56
5. Kalabaev S. B., Yuldoshbaeva M. R. Hydrographic description of water bodies of the Lower Amu Darya. *Bulletin of the Geographical Society of Uzbekistan.* 2019. Vol. 56. P. 235–239.
6. Kostianoy A. G., Kostianaia E. A., Lebedev S. A., Serykh I. V., Prokofiev Y. A. Interannual variability in the level of lakes in northwestern Russia / Proceedings of the VI International

Scientific and Practical Conference "Fundamental and Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies". Maykop State Technological University. Maykop, 17–21 May 2021. Part 1. P. 158–167.
7. Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Satellite Altimetry of the Caspian Sea / Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry. Venice. Italy. 13–18 March 2006. Vol. SP 614.
8. Troitskaya Y. I., Rybushkina G. V., Soustova I. A., Balandina G. N., Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Satellite altimetry of inland water bodies. *Hydrophysical Processes.* 2012. Vol. 39. P 184–199.
9. Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Kazmina M. V., Tsepelev V. Y., Varlashina V. M., Neschadimova T. G. Satellite Monitoring of Transboundary Waters of Russia and Estonia. M.: Signal, 2012. 16 p.
10. Kalabaev S. B. Possibilities of using spectral indices in determining the boundaries of surface water bodies using Landsat. *Hydrometeorology and environmental monitoring*. 2023. No. 4. P. 36–43.
11. Kalabaev S. B., Artikova F. Ya. Mapping and monitoring of lakes based on satellite observation data. *Hydrometeorology and environmental monitoring*. 2024. No. 1. P. 87–92.
12. Kalabaev S. B., Adenbaev B. E. Evaluation of the changing water surface of the Lake Mezhdurechye with satellite images / Proceedings of international scientific/practical conference "The role of modern geoinformational cartography, methods and technological remote sensing in geographic research". Tashkent, 2024. P. 505–508.

Сведения об авторе:

Калабаев Салауат Бахитбай ули, заведующий лабораторией математического моделирования гидрологических процессов и водных ресурсов, Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Узбекистан, 100052, Ташкент, ул. 1-й проезд Бодомзор йули, 72; старший преподаватель кафедры экологии и охраны окружающей среды Ташкентского государственного аграрного университета, Узбекистан, 100700, Ташкентская область, Кибрайский район, ул. Университетская, 2а; https://orcid.org/0000-0001-5188-7383; e-mail: salauat.kalabaev@gmail.com

About the author:

Salauat B. Kalabaev, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Hydrological Processes and Water Resources, Hydrometeorological Research Institute, Uzbekistan, 100052, Tashkent, 1st passage Bodomzor yuli str., 72; Senior Lecturer of the Department of Ecology and Environmental Protection, Tashkent State Agrarian University, Uzbekistan, 100700, Tashkent Region, Kibray District, University Street, 2a; https://orcid.org/0000-0001-5188-7383; e-mail: salauat.kalabaev@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 31.10.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 14.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 29.12.2025.

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 0,6–0,8 авторского листа (25–30 тыс. знаков с пробелами, не более 30 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, В. А. Федотов.
Дизайн С. Ю. Дорохов.
Перевод: А. Б. Кочев, И. А. Софронова.
Подписано в печать 27.02.2026. Дата выхода в свет 17.03.2026.
Формат 70x100 1/16. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 100 экз. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «Принт»,
юридический адрес: 426035, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Тимирязева, д. 5, помещ. 5.

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 25–30 thousand of characters with blanks, not more than 30 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.

Editors: T. M. Printseva, V. A. Fedotov
Design S. Y. Dorokhov
Translation: A. B. Kochev, I. A. Sofronova
Signed for publication. 27.02.2026. Data of issue 17.03.2026
Format 70x100 1/16. Conditional printing sheets: 7.5. Edition 100 copies. Price free.
Printed in OOO "Print" printing house,
legal address: ul. Timiryazeva, 5–5, Izhevsk, 426035, Udmurt Republic, Russia

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

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

Индекс / Index 39076

