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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

научно-практический журнал

№ 5, 2026

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

scietific | practical journal

No. 5, 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
Болгов М. В., д-р техн. наук, профессор, Институт водных проблем Российской академии наук (Москва, Россия)

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

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

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

научно-практический журнал

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

scientific/practical journal

№ 5, 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
Mikhail V. Bolgov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Water Problems Institute (Moscow, Russia)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD
Sergey D. Belayev, Dr. Sc. (Geographical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, 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 задаче управления уровнем Каспийского моря
М. В. Болгов 5

Водообеспеченность и качество водных ресурсов как детерминанты промышленной безопасности регионов Юга России
Л. Г. Матвеева, Н. А. Косолапова, М. В. Папушенко, М. М. Головачева 20

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Результаты кластерного анализа гидрохимических показателей поверхностных источников водопользования населения на засушливых территориях с семиаридным климатом
Л. П. Эрдниев, А. Н. Микеров, С. В. Касимцев, Н. В. Касимцева, Т. А. Мухитдинова 46

Гидроэкологические аспекты осадкообразования в водоемах Европейской территории России
В. В. Законнов 61

Тепловые балансы волжских водохранилищ
С. А. Поддубный 77

Особенности пространственно-временных изменений гидрофизических и гидрохимических характеристик воды в гидросистеме ГМЗ «Петергоф»
А. В. Горбунова, М. Л. Марков, Г. В. Пряхина, А. В. Козачек 92

CONTENT

WATER/ECONOMIC SECTOR MANAGEMENT

On the problem of the Caspian Sea level management
M. V. Bolgov 5

Water supply and quality of water resources as determinants of regional industrial safety of the South of Russia
L. G. Matveyeva, N. A. Kosolapova, M. V. Papushenko, M. M. Golovacheva 20

WATER RESOURCES STUDIES

Results of a cluster analysis of hydrochemical parameters of surface water sources used by population on arid territories with semiarid climate
L. P. Erdniev, A. N. Mikerov, S. V. Kasimtsev, N. V. Kasimtseva, T. A. Mukhitdinova 46

Hydroecological aspects of sediment formation in water bodies of the European territory of Russia
V. V. Zakonnov 61

Heat balances of the Volga reservoirs
S. A. Poddubny 77

Special features of spatial/temporal changes of hydro/physical and hydro/chemical characteristics of water within the “Peterhof” museum hydro/system
A. V. Gorbunova, M. L. Markov, G. V. Pryakhina, A. V. Kozachek 92

УДК 556.048

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-5-19

Оригинальная статья / Original paper

К задаче управления уровнем Каспийского моря

М. В. Болгов[1,2]

bolgovmv@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Прогнозирование уровня Каспийского моря, характеризующегося значительной временной дисперсией, представляет собой сложнейшую задачу современной гидрометеорологии. Наблюдающиеся непредсказуемые колебания уровня моря, обусловленные, в числе прочих причин, происходящими климатическими изменениями, оказывают огромное воздействие на экосистему моря и на объекты инженерной инфраструктуры на побережье. Решение многих прикладных задач увязывается с возможностями управления уровнем Каспийского моря, в т. ч. при реализации масштабных проектов перераспределения водных ресурсов в пределах больших географических регионов. В статье рассматриваются модели и методы описания колебаний уровня моря и управления его водным режимом. **Методы.** Основной метод исследования – вероятностное моделирование уровенного режима моря на основе решения стохастического уравнения его водного баланса, а также определение оптимального управления уровнем воды методом динамического программирования. **Результаты.** На основе имеющихся данных наблюдений и выводов, опубликованных в разных работах, в части обоснования вероятностных моделей, оценивания параметров и схем управления уровнем Каспия, предложены оценки водных ресурсов, необходимые для решения поставленной задачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Каспийское море, колебания уровня воды, водные ресурсы, стохастическое моделирование, вероятностное прогнозирование, управление, динамическое программирование

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Часть работы, связанная с обоснованием алгоритма динамического программирования, выполнена в рамках темы № FMWZ-2026-0004 Государственного задания ИВП РАН.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Болгов М. В. К задаче управления уровнем Каспийского моря // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 5–19; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-5-19; EDN: NSMYZJ

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает признательность А. Е Косолапову за полезные дискуссии по обсуждаемому вопросу.

© Болгов М. В., 2026

On the problem of the Caspian Sea level management

Mikhail V. Bolgov[1,2]

bolgovmv@mail.ru

[1] *Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-on-Don, Russia*
[2] *Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Predicting sea level in the Caspian Sea, characterized by significant temporal variability, is a complex task in modern hydrometeorology. The observed unpredictable sea level fluctuations, caused, among other factors, by ongoing climate change, have a significant impact on the marine ecosystem and coastal infrastructure. The solution of many applied problems is linked to the potential for Caspian Sea level management, including the implementation of large-scale water resource redistribution projects across large geographic regions. This article discusses models and methods for describing sea level fluctuations and managing its water regime. **Methods.** The primary research method is probabilistic modeling of sea level conditions based on solving a stochastic water balance equation, as well as determining optimal water level control using dynamic programming. **Results.** Based on available observational data and conclusions published in various studies on the validation of probabilistic models, estimation of parameters, and schemes for controlling the Caspian Sea's water level, water resource estimates necessary for solving the problem are proposed.

KEYWORDS: Caspian Sea, water level fluctuations, water resources, stochastic modeling, probabilistic forecasting, control, dynamic programming

FINANCING: A part of work associated with substantiation of the dynamic programming algorithm has been performed within the framework of topic No. FMWZ-2026-0004 of the State Assignment of VPI of the RAS.

FOR CITATION: Bolgov M. V. On the problem of the Caspian Sea level management. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 5. P. 5–19; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-5-19; EDN: NSMYZJ

ACKNOWLEDGEMENTS: The Author expresses his highly appreciation to A. E. Kosolapov for helpful discussions of the matter under consideration.

ВВЕДЕНИЕ

Решение инженерных задач, связанных с использованием и управлением водными ресурсами, осуществляется на основе научно обоснованных моделей, адекватно воспроизводящих свойства гидрологического режима рек и озер и позволяющих решать технические (водохозяйственные) задачи с приемлемой точностью. Среди них особо выделяются вопросы многолетнего ре-

гулирования стока и прогнозирования уровня воды замкнутых водоемов. Эти задачи требуют создания адекватных вероятностных моделей многолетней изменчивости гидрологических явлений, что в целом затруднено по причине ограниченного объема данных натурных наблюдений: имеющиеся временные ряды имеют продолжительность, как правило, не более 100 лет. Тем не менее стохастические модели многолетних колебаний стока и уровня водоемов были разработаны в советской инженерной гидрологии С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем в 1940-е годы [1, 2], затем существенно дополнены в их же работах и впоследствии получили развитие в трудах М. И. Будыко, М. И. Багрова, В. Е. Привальского, Д. Я. Ратковича, И. А. Шикломанова и многих других ученых [3–10]. Упомянутыми выше авторами исследовались задачи моделирования в различной постановке (непрерывной и дискретной). Важным мотивационным поводом для разработки таких моделей и постановки задачи управления уровнем моря были планировавшиеся в те годы, но не реализованные по разным причинам проекты территориального перераспределения водных ресурсов СССР.

Непредсказуемое поведение уровня Каспийского моря (рис. 1) приводило к большим ущербам для экономики прибрежных территорий, что побуждало обсуждение различных подходов к его управлению [11–14]. Выдвигались идеи отсечения мелководных частей акватории моря как источника значительных потерь воды на испарение, исследовались возможности перераспределения стока как в бассейн Волги, так и из бассейна Каспийского моря (при повышении уровня моря), предлагалось регулировать отток в залив Кара-Богаз-Гол. Из упомянутого перечня было реализовано одно мероприятие – перекрытие пролива, соединяющего залив Кара-Богаз-Гол с морем, путем сооружения «глухой» дамбы. При последовавшем за этим внезапном повышении моря эта перемычка была разрушена в 1990-е годы. Залив в тот период высыхал практически полностью.

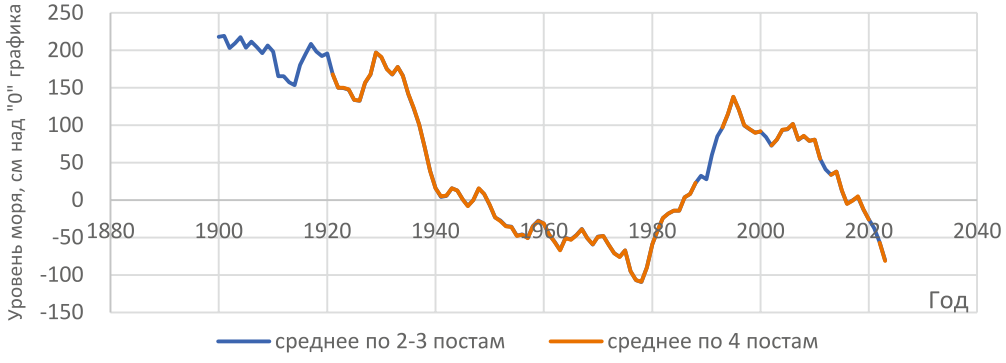


Рис. 1. Среднегодовые уровни Каспийского моря, осредненные по четырем пунктам наблюдений (по данным CASPCOM)

Fig. 1. The Caspian Sea average annual levels averaged by four items of observations (according to CASPCOM data)

Предметом данной статьи является обсуждение реализуемости имеющихся подходов к управлению уровнем Каспийского моря в части оценки величины управленческих воздействий. Задача решается на основе вероятностного прогноза колебаний уровня Каспийского моря, который, в свою очередь, осуществляется при ряде ограничений и приближений. Основное приближение состоит в том, что рассматриваемая гидрологическая задача решается в «нульмерной» постановке: предполагается, что вся масса моря сосредоточена в точке и пространственной изменчивостью структуры объекта можно пренебречь. В действительности пространственная изменчивость процессов довольно значительна: неравномерно распределены по площади характеристики испарения и осадков, сток Волги, составляющий более 80 % от общего притока, сосредоточен в одной точке в северной части моря. В результате поверхность моря имеет уклон с севера на юг, среднее падение составляет примерно 20 см.

Каспийское море не является абсолютно замкнутым водоемом, часть воды вытекает в залив Кара-Богаз-Гол. Зависимость величины оттока в залив от уровня моря носит нелинейный характер, и эта нелинейность в аналитических моделях вероятностного прогноза, как правило, не учитывается по причине сложности получаемых уравнений. В аналитических выводах и оценках отток в залив учитывается как некоторое среднее значение, на которое уменьшается норма притока. Однако если и учесть эту зависимость при проведении имитационных расчетов, то надо иметь в виду, что расход в проливе зависит еще и от степени размыва (или занесения) его русла. Такого рода оценки делаются по факту происхождения, например, после раскрытия дамбы, перекрывавшей пролив, поперечный профиль сильно изменился. Учесть такие изменения в прогнозных расчетах на многолетний период сложно.

Вероятностные модели многолетней изменчивости побуждающих процессов (притока и испарения) в инженерной гидрологии обычно рассматриваются в классе стационарных марковских процессов. Стационарным при такой постановке является и процесс колебаний уровня моря. Марковость временных рядов является приближением, но имеющиеся в распоряжении гидрологов временные ряды не позволяли обосновывать более сложные гипотезы. Сегодня по причине климатических изменений необходимо принимать во внимание нарушение стационарности наблюдаемых и прогнозируемых временных рядов и использовать более сложные подходы. На рис. 2 и рис. 3 представлены колебания основных гидрометеорологических параметров – суммарного притока воды к морю и испарения с водной поверхности. Практически реализуемой гипотезой является предположение о том, что новый режим многолетних колебаний гидрометеорологических процессов, по крайней мере на период планирования водохозяйственной деятельности, будет также марковским и стационарным, но неопределенность оценок параметров распределений может возрастать.

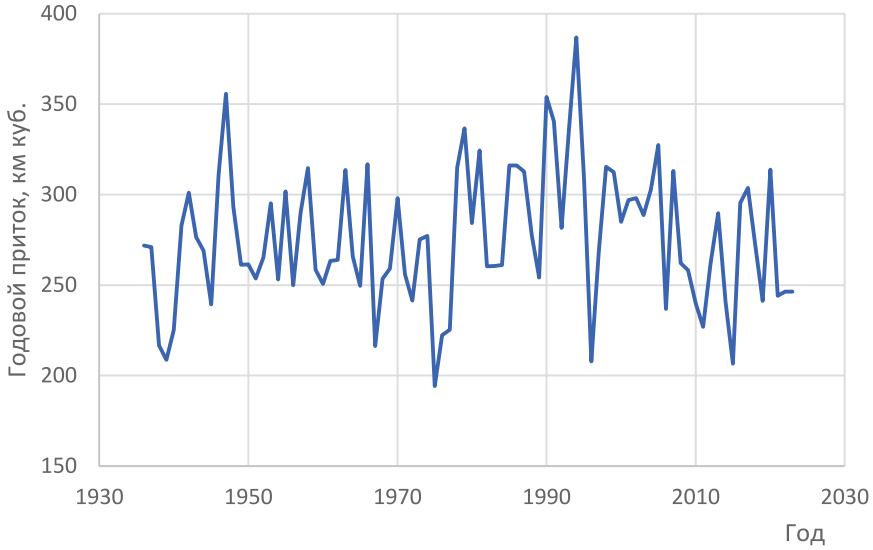


Рис. 2. Многолетние колебания суммарного притока воды к Каспийскому морю
Fig. 2. Many-year fluctuations of the total water inflow to the Caspian Sea

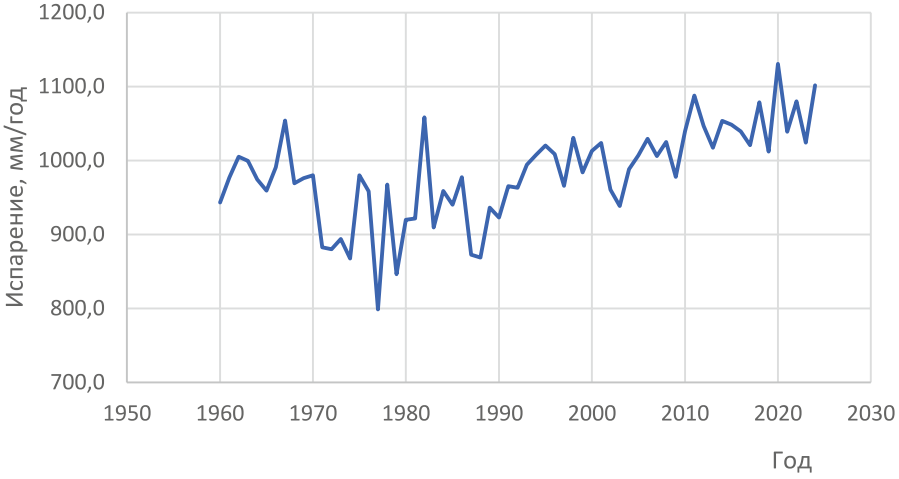


Рис. 3. Испарение с водной поверхности моря по данным реанализа
Fig. 3. Evaporation from the sea water surface according to the retrospective analysis data

Величины испарения с водной поверхности моря и значения речного притока в данной постановке задачи управления рассматриваются как независимые случайные величины. Не зависит величина слоя испарения и от уровня моря. Конечно, гидрофизические процессы на Каспии определяются многими параметрами, и испарение, например, в прибрежной мелководной части может зависеть от глубины (толщины слоя воды), от параметров волновой деятельности, которая также определяется глубиной в береговой зоне. Проблема состоит в невозможности объективной оценки этих эффектов: необходимых измерений практически не проводится, а сама прибрежная полоса моря явля-

ется лишь небольшой частью всей акватории Каспия. Практически не измеряются и осадки на водную поверхность моря (только на береговых станциях), что вынуждает использовать в расчетах разницу испарения и осадков, т. н. видимое испарение. Значения видимого испарения можно получить по данным обратных водобалансовых расчетов.

Безвозвратное водопотребление, учитываемое в виде констант, на будущие расчетные периоды может быть задано только в виде сценариев. Неопределенность оценок водопотребления велика, а эффект может быть заметным. Так, например, дополнительные 10 км^3/год безвозвратных изъятий могут понизить уровень равновесия до полуметра, что необходимо учитывать при прогнозах.

Располагая оценками основных компонентов водного баланса (речного притока и видимого испарения), а также методикой расчета уровня воды водоема, можно перейти к изучению возможности управления его уровенным режимом. Задача управления уровнем моря предполагает, кроме знания свойств объекта управления, еще и формулирование стратегии управления. В случае Каспийского моря возможными стратегиями управления могут быть либо дополнительное поступление воды в море за счет территориального перераспределения стока, либо изъятия стока с соответствующей передачей в другие бассейны, либо регулируемый сброс в залив Кара-Богаз-Гол. Предметом статьи являются оценки возможных управляющих воздействий, обеспечивающих желательный уровенный режим моря, не затрагивая обоснования возможности дополнительного источника воды или водоприемника.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача управления уровнем моря предполагает использование вероятностной модели многолетних колебаний уровня воды такой степени сложности, которая позволяет учитывать основные факторы процесса и с достаточной степенью надежности находить оптимальное управление. Для этих целей в ряде работ применяется аппарат цепей Маркова различной сложности, к обсуждению возможностей которого обратимся далее.

В дискретной форме уравнение водного баланса моря в форме последовательностей наполнения моря для смежных моментов времени получено С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем [1, 2] и в обозначениях М. С. Маркиша [12] для годовых интервалов времени записывается в следующем виде:

$$W_{t+1} = \varphi W_t + v_t - e_t F_0 + K_t - Z_t, \quad (1)$$

где t – номер года;

W – объем воды в море, выраженный в отклонениях от уровня тяготения;

v_t – объем годового притока в естественных условиях;

e_t – величина видимого испарения;

F_0 – площадь водного зеркала, соответствующего уровню тяготения;

φ – постоянная, зависящая от наклона берегов и среднего слоя видимого испарения;

K_t – объем дополнительной переброски (управление);

Z_t – объем изъятий (безвозвратного водопотребления).

В постановке, рассмотренной в [12–14], полагалось, что величина изъятий носит случайный характер и эта изменчивость должна учитываться в прогнозах. Однако надо отметить, что величина изъятий оценивается весьма приближенно, ее вариации по годам зависят от функционирования и развития экономики государств, чьи территории расположены в бассейне моря. Изменчивость испарения с водохранилищ существенно меньше изменчивости притока к морю, и безвозвратные изъятия в целом составляют первые проценты от общего объема притока. Эффект влияния изменчивости изъятий на уровенный режим моря оказывается весьма незначительным, поэтому мы можем этой изменчивостью в дальнейшем пренебречь и рассматривать величины изъятий как константы для отдельных лет.

Для поиска оптимальной стратегии управления М. С. Маркишем сделаны следующие допущения. Пренебрегая изменчивостью дополнительных изъятий, примем, что величины $a_t = v_t - e_t F_0$ образуют некоррелированную случайную последовательность с нулевым средним и дисперсией $\sigma^2 = \sigma_v^2 + F_0^2 \sigma_e^2$. Тогда уравнение динамики наполнения Каспийского моря принимает вид:

$$W_{t+1} = \varphi W_t + a_t + K_t - Z_t. \qquad (2)$$

Уравнение (2) записано нами без учета временной изменчивости безвозвратных изъятий.

Далее делается предположение, что величина управляющего воздействия (управления) ограничена $0 \le K_t \le G_t$, где G_t – максимальный объем дополнительных водных ресурсов (мощность управления), доступный в *t*-м году. Собственно задача управления заключается в поддержании уровня моря в пределах требуемого диапазона колебаний, который задается с помощью верхнего (H_{max}) и нижнего (H_{min}) пределов. Иначе это можно интерпретировать как указание на то, что время пребывания уровня моря внутри заданного интервала должно быть максимально.

Цель управления задается как удержание уровня воды в море в пределах интервала [H_{max}, H_{min}] с наибольшей вероятностью. Оптимальную стратегию в работе [12] предложено искать в форме $0 \le \widehat{K_t(W)} \le G_t$, т. е. в виде функции от состояния системы (наполнения моря *W*) и времени *t*. В этом случае за пределами оптимального интервала управление равно либо 0, либо G_t.

Сделанные выше допущения принимались автором работы [12], исходя из решения поставленной в те годы задачи: оптимальное управление уровнем моря должно было осуществляться в режиме компенсации растущих заборов воды на нужды безвозвратного водопотребления (в основном орошения) за счет реализации проектов межбассейновой переброски стока рек. В современных условиях, когда объем безвозвратного водопотребления стабилизировался, а к возможностям межбассейновой переброски стока начали подходить, исходя из приоритета экологических последствий и экономической целесообразности, постановка задачи поиска оптимального управления изменяется. Нижний предел управления в общем случае не может быть равен нулю, поскольку в стационарных условиях дополнительное питание будет приводить к росту среднего уровня моря.

Обратимся к задаче поиска оптимального управления уровнем моря. Для этого в работе [12] предложено определять оптимальную стратегию управления методом динамического программирования на основе принципа оптимальности Беллмана. Уравнение Беллмана предложено записывать в следующем виде:

$$\chi_{\mathrm{t}}(W) = MAX_{\mathrm{k_t}} \left[\int_{\mathrm{w_{min}}}^{\mathrm{w_{max}}} dF_{\mathrm{t+1}}(y/w)(1 + \chi_{\mathrm{t+1}}(y))\right]. \quad (3)$$

Здесь *F(y/w)* обозначает условную функцию распределения наполнения моря *y* в момент времени *t*+1 при заданном наполнении *w* в момент времени *t*. В предложенной постановке критерием управления служит вероятность попадания уровня воды в заданный интервал управления, и эта вероятность должна быть максимальной.

Для задания условного распределения наполнения водоема применяется подход, известный в теории регулирования стока [15] и заключающийся в следующем. В соответствии с уравнением (2) условная функция распределения вероятностей наполнения моря *y* в последующий момент времени *t*+1 при заданном наполнении *w* в момент времени *t* равна функции распределения результирующей случайных величин притока и испарения:

$$F_{\mathrm{w_{t+1}}}(y/w) = F_{\mathrm{\varphi w + a_t - k_t + z_t}} = F_{\mathrm{a_t}}(y - \varphi w - k_{\mathrm{t}} + Z_{\mathrm{t}}). \quad (4)$$

Поскольку для функции распределения результирующей случайных величин притока и испарения применим нормальный закон распределения *N* с нулевым средним и дисперсией σ^2, рассчитываемой по формуле суммы дисперсий компонент, то уравнение (4) перепишется в виде:

$$\chi_t(W) = MAX_{\mathrm{k_t}} \left[\int_{\mathrm{w_{min}}}^{\mathrm{w_{max}}} N'(y - \varphi w - K_{\mathrm{t}} + Z_{\mathrm{t}})\,(1 + \chi_{\mathrm{t+1}}(y))\right]. \quad (5)$$

Из условия максимума выражения в квадратных скобках в правой части уравнения (5) находится оптимальное управление $\widehat{K}_t$.

Поиск оптимального управления на основе принципа динамического программирования заключается в последовательном решении обратным ходом по времени уравнения (5). На каждом временном интервале ищется управление, которое доставляет максимум интегралу в правой части уравнения (5) для каждого наполнения моря. Выполнив серию расчетов для всех наполнений моря, получим оптимальное управление в виде объема ежегодно добавляемой воды в зависимости от уровня моря.

Располагая оптимальным управлением и формулой (4), можно рассчитать закон распределения вероятностей наполнения моря в последующий момент времени при заданном распределении в настоящий момент. Стационарная задача может быть решена на основе соответствующего интегрального уравнения [16]. При известном начальном уровне моря предполагается, что его распределение вероятностей аппроксимируется дельта-функцией, которая, в свою очередь, заменяется нормальным распределением вероятностей с малой дисперсией. Это вполне допустимо, так как уровень моря всегда известен с некоторой погрешностью, определяемой ошибками измерений.

Для определения закона распределения наполнения моря в произвольный момент времени М. С. Маркишем предложено применить формулу полной вероятности, которая, в марковском случае, записывается в следующем виде:

$$f_{t+1}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f_t(y) dF_{w_{t+1}}(w/y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_t(y) N'(w - \varphi y - \widehat{K}_t + Z_t)\, dy. \quad (6)$$

Выполнив численное интегрирование в формуле (6) для достаточно продолжительного периода времени, получаем стационарное распределение вероятностей наполнений уровня Каспийского моря. Для проверки правильности вычислений и допустимости сделанных предположений сравним результаты вычисления интеграла в уравнении (6) с параметрами распределений уровня моря, полученными путем аналитического решения стохастического дифференциального уравнения водного баланса моря В. Е. Привальским и др. Как показано в работе [6], в стационарном случае среднеквадратическое отклонение (СКО) уровня моря при линейной зависимости площади от уровня составляет 0,81 м. Численное решение уравнения (6) при отсутствии управления и тех же параметрах притока и испарения, принятых в работе [6], дает значение СКО, равное 0,78. Это допустимое расхождение, поскольку в рассмотренной вероятностной схеме не учитывается автокорреляция побуждающих процессов. В работе [17] показано, что при использовании марковского приближения для уровней моря условная дисперсия несколько завышается при заблаговременности вероятностного прогноза до 10 лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основной вопрос при определении оптимального варианта управления уровнем моря заключается в назначении диапазона колебаний, приемлемого исходя из технических или экологических соображений. Этот диапазон будет различным для задач инженерной защиты прибрежных территорий, для экологических задач, для сохранения и воспроизводства водных биоресурсов, для задач поддержания устойчивого функционирования объектов транспортной инфраструктуры. В инженерной практике для оценки гидрологических характеристик используется понятие расчетной обеспеченности, отвечающей некоторой заданной надежности систем или сооружений. В случае Каспийского моря таких систем много, каждый объект проектируется на свою расчетную обеспеченность, поэтому обоснование допустимого интервала управления моря еще предстоит выполнить с учетом множества экологических, технических и экономических факторов. Целью данного исследования является оценка возможности поддержания «назначенного» из некоторых соображений диапазона уровней за счет управления с различными показателями.

Как отмечалось выше, в имеющихся аналитических подходах и оценках колебания уровня моря рассчитывались без учета оттока в залив Кара-Богаз-Гол. Это относится и к работам М. С. Маркиша, и к оценкам В. Е. Привальского, и ко многим другим. Точнее можно сказать, что отток в залив учитывается путем корректировки нормы притока. В ряде работ указывается, что зависимость оттока от уровня моря может быть аппроксимирована однозначной кривой при ее ограничении сверху максимальным значением испаряющей способности залива 20 км^3 в год. В таком случае уравнение (2) перепишем в следующем виде:

$$W_{t+1} = \varphi W_t + a_t + K_t - Z_t - KBG(w). \qquad (7)$$

Поскольку связь оттока в залив и уровня моря принимается функциональной, то условная вероятность наполнения уровня моря в случае расчетов по формуле (7) по-прежнему будет определяться вероятностью побуждающих факторов (притока и испарения).

Выбор оптимального управления, конечно, потребует технико-экономического обоснования мероприятий, что предметом данного исследования не является. Дальнейшие расчеты оптимального управления выполним при заданных значениях гидрометеорологических параметров и некоторых сценарных показателях управленческих воздействий. Уровень тяготения Каспийского моря составляет −28,5 м БС, что соответствует норме притока 275 км^3/год и слою видимого испарения 0,75 м/год. В качестве допустимого интервала колебаний уровня моря примем двухметровый диапазон −29,5…−27,5 м. Здесь и далее все отметки в Балтийской системе. Дисперсия годовых значений притока составит 2500 км^6, дисперсия годовых значений видимого испарения – 0,007 м^2.

Дальнейшие расчеты выполняются для нескольких вариантов, перечисленных в табл. 1. Зададимся предельными значениями мощности управления G_t и выполним оптимизационные расчеты методом динамического программирования. G_t примем постоянным во времени, что не является ограничением метода, т. к. допускается изменение по времени всех параметров разностного уравнения (7).

Таблица 1. Варианты управления уровнем Каспийского моря
Table 1. Versions of the Caspian Sea level management

№	Описание варианта управления	Обозначения на рис. 1
1	Вариант без учета оттока в залив Кара-Богаз-Гол (КБГ) со значением мощности 20 км^3/год и с нижним значением мощности, равным 0	Ряд 1
2	Вариант с учетом оттока в залив КБГ со значением мощности 20 км^3/год и с нижним значением мощности управления, равным 0	Ряд 2
3	Вариант с учетом оттока в залив КБГ со значением мощности 2 км^3/год 0 и с нижним значением мощности управления, равным −20 км^3/год	Ряд 3
4	Вариант с учетом оттока в залив КБГ со значением мощности 40 км^3/год и нижним значением −10 км^3/год	Ряд 4

В табл. 2 и на рис. 4 приведены результаты поиска оптимального управления в виде параметров распределений прогнозных плотностей распределения уровня моря при практически стационарном состоянии (через 50 лет расчетов).

На рис. 4 представлены прогнозные плотности распределения уровня Каспийского моря для различных значений максимальной мощности управления. Под номером 5 на рис. 4 дополнительно приведена плотность распределения уровня моря для варианта при отсутствии управления и без учета водообмена с заливом Кара-Богаз-Гол. По результатам расчетов можно отметить следующее.

Рассмотренная ранее в работе [12] схема управления без учета оттока в Кара-Богаз-Гол позволяет повысить минимальные значения уровня моря (ниже уровня тяготения), но уровни выше среднего в этой схеме практически не регулируются. Выше отметки −27,5 м плотности с управлением и без управления практически совпадают. Нахождение уровня моря в оптимальном двухметровом диапазоне имеет в этом случае вероятность 92 %.

В предложенной схеме расчетов, но уже с учетом оттока в залив, удается стабилизировать колебания уровня моря в заданном диапазоне с вероятностью 99 % при максимальной мощности управления 20 км^3 в год. Такая вероятность является приемлемой, например, для целей инженерной защиты территорий. При увеличении мощности управления до 40 км^3 в год и при возможности реверсивного управления (например, допуская передачу водных ресурсов в бассейн Дона в объеме 10 км^3 в год) вероятность нахождения в оптимальном диапазоне будет составлять 99,9 %.

Распределение вероятностей уровня моря в стационарном режиме будет при реализации управления отличаться от нормального, но не столь значительно. Величина эксцесса распределения доходит до 4 и более.

Таблица 2. Параметры уровня Каспийского моря при различных вариантах управления при начальном уровне воды −29,3 м

Table 2. The Caspian Sea level parameters with different versions of management at the initial –29.3 m water level

№	Верхний предел мощности управления G_{max}, км³/год	Нижний предел мощности управления G_{min}, км³/год	Вероятность попадания в оптимальный интервал через 50 лет	Параметры распределения уровня моря через 50 лет после начала расчета			
			P, в долях от 1	Среднее, м	СКО, м	Асимметрия	Эксцесс
1	20	0	0,921	−28,23	0,48	0,43	3,6
2	20	0	0,989	−28,48	0,36	−0,05	3,8
3	20	−20	0,995	−28,53	0,29	−0,54	4,3
4	40	−10	0,999	−28,46	0,24	0,19	4,0

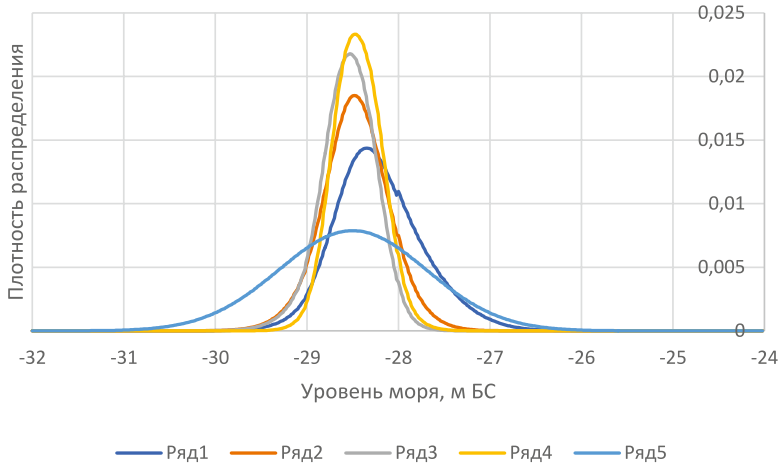


Рис. 4. Плотности распределения уровня Каспийского моря при различных подходах к управлению. Условные обозначения в тексте и в табл. 1

Fig. 4. The Caspian Sea level distribution densities with different approaches to management. The legent in the text and in Table 1

Важный результат, сформулированный в работах М. С. Маркиша и подтвержденный в данном исследовании, заключается в форме зависимости оптимального управления от уровня моря. В работах [13, 14] М. С. Маркиш обосновывал так называемый релейный принцип управления. При таком подходе последовательность управляющих воздействий принимает либо максимальное, либо минимальное значение. Промежуточные значения не оптимальны. Выполненные расчеты показали, что при реализации схемы динамического программирования получается именно такой результат, представленный на

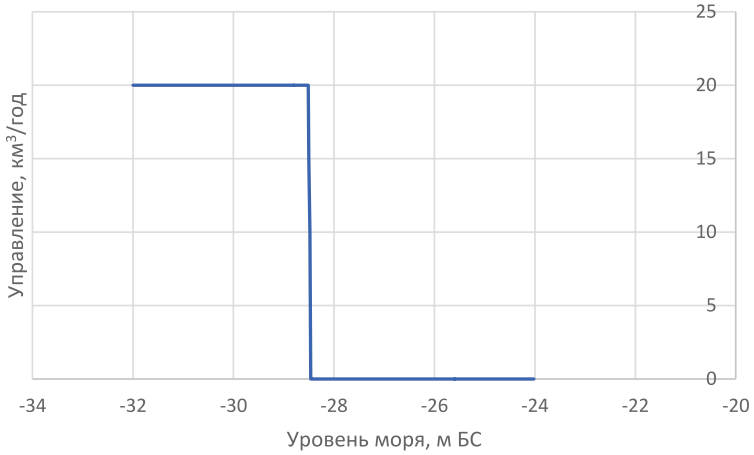


Рис. 5. Оптимальное управление уровнем Каспийского моря
Fig. 5. The Caspian Sea level optimal management

рис. 5. При уровне моря ниже уровня тяготения система подачи воды работает на полную мощность, а при превышении этого уровня подача воды прекращается.

ВЫВОДЫ

По результатам выполненного исследования возможностей управления уровнем Каспийского моря можно сформулировать следующие выводы.

Используя в качестве критерия оптимизации вероятность попадания уровня моря в заданный оптимальный интервал, можно методом динамического программирования обосновать режимы управления при заданной мощности. При мощности управления 20 км^3 в год вероятность нахождения уровня моря в двухметровом оптимальном диапазоне составит 99 %, что достаточно для большинства технических задач.

Следует отметить, что эта величина мощности несколько превышает весь годовой объем так называемой планировавшейся «северной» переброски стока в бассейн Волги [18], что означает необходимость тщательного технико-экономического обоснования поиска дополнительного источника.

Отдельной, но связанной задачей является обоснование оптимального интервала колебаний уровня Каспия, исходя из условий инженерной защиты прибрежных территорий, надежности функционирования транспортной инфраструктуры, условий функционирования экосистемы моря в части условий воспроизводства водных биоресурсов и т. д. Эта задача пока не решена.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Труды Гидропроекта. 1964. № 12. С. 29–61.
2. Крицкий С. Н. Методика анализа и расчета колебаний уровня замкнутых водоемов // Водные ресурсы. 1973. № 6. С. 9–26.
3. Багров Н. А. О колебаниях уровня бессточных озер // Метеорология и гидрология. 1963. № 6. С. 41–46.
4. Будыко М. И., Юдин М. И. О колебаниях уровня непроточных озер // Метеорология и гидрология. 1960. № 8. С. 15–19.
5. Крицкий С. Н., Коренистов Д. В., Раткович Д. Я. Колебания уровня Каспийского моря (анализ режима и вероятностный прогноз). М.: Наука, 1975. 158 с.
6. Музылев С. В., Привальский В. Е., Раткович Д. Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 184 с.
7. Болгов М. В., Красножон Г. Ф., Любушин А. А. Каспийское море: Экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 381 с.
8. Болгов М. В., Филимонова М. К. Об источниках неопределенности при прогнозировании уровня Каспийского моря и оценке риска затопления прибрежных территорий // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 664–669.
9. Раткович Д. Я., Болгов М. В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 389–404.
10. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., Ежов А. В. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря. В кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 327–341.
11. Подольский Е. М. Проблема оптимального управления уровнем Каспийского моря и методические основы ее решения // Водные ресурсы. 1975. № 4. С. 81–108.
12. Маркиш М. С. Об оптимальном управлении уровнем бессточного водоема (на примере Каспийского моря) // Водные ресурсы. 1977. № 5. С. 42–46.
13. Маркиш М. С. Управление уровнем замкнутого водоема в стационарном режиме // Водные ресурсы. 1979. № 3. С. 28–38.
14. Маркиш М. С. Об оптимальном регулировании уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1982. № 2. С. 20–35.
15. Картвелишвили Н. А. К теории многолетнего регулирования речного стока // Известия ВНИИ гидротехники. Л., 1958. Т. 58. С. 231–232.
16. Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 192 с.
17. Болгов М. В. Марковские процессы в задаче прогнозирования уровня замкнутого водоема // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 74–85.
18. Проблема территориального перераспределения водных ресурсов. Под ред. Г. В. Воропаева и Д. Я. Ратковича. М.: Изд-во АН СССР. Институт водных проблем, 1985. 504 с.

REFERENCES

1. Kritsky S. N., Menkel M. F. Fluctuations in the Level of Enclosed Reservoirs. *Proceedings of Gidroproekt*. 1964. No. 12. P. 29–61.
2. Kritsky S. N. Methodology for Analysis and Calculation of Fluctuations in the Level of Enclosed Reservoirs. *Water Resources*. 1973. No. 6. P. 9–26.
3. Bagrov N. A. On Fluctuations in the Level of Endorheic Lakes. *Meteorology and Hydrology*. 1963. No. 6. P. 41–46.
4. Budyko M. I., Yudin M. I. On Fluctuations in the Level of Stagnant Lakes. *Meteorology and Hydrology*. 1960. No. 8. P. 15–19.
5. Kritsky S. N., Korenistov D. V., Ratkovich D. Ya. Caspian Sea Level Fluctuations: Regime Analysis and Probability Forecast. Moscow: Nauka, 1975. 158 p.

6. Muzylev S. V., Privalsky V. E., Ratkovich D. Ya. Stochastic Models in Engineering Hydrology. Moscow: Nauka, 1982. 184 p.
7. Bolgov M. V., Krasnozhon G. F., Lyubushin A. A. Caspian Sea: Extreme Hydrological Events. Moscow: Nauka, 2007. 381 p.
8. Bolgov M. V., Filimonova M. K. On the Sources of Uncertainty in Caspian Sea Level Forecasting and Assessing the Risk of Coastal Flooding. *Water Resources*. 2005. Vol. 32. No. 6. P. 664–669.
9. Ratkovich D. Ya., Bolgov M. V. Study of Probabilistic Regularities of Long-Term Fluctuations in the Caspian Sea Level. *Water Resources*. 1994. Vol. 21. No. 4. P. 389–404.
10. Shiklomanov I. A., Georgievskiy V. Yu., Yezhov A. V. Probabilistic Forecast of the Caspian Sea Level. In: Hydrometeorological Aspects of the Problem of the Caspian Sea and Its Basin. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003. P. 327–341.
11. Podolskiy E. M. The Problem of Optimal Control of the Caspian Sea Level and Methodological Foundations of Its Solution. *Water Resources*. 1975. No. 4. P. 81–108.
12. Markish, M. S. On Optimal Control of the Water Level of an Endorheic Reservoir (using the Caspian Sea as an Example). *Water Resources*. 1977. No. 5. P. 42–46.
13. Markish M. S. Control of the Water Level of an Enclosed Reservoir in a Steady-State Mode. *Water Resources*. 1979. No. 3. P. 28–38.
14. Markish M. S. On Optimal Regulation of the Caspian Sea Water Level. *Water Resources.* 1982. No. 2. P. 20–35.
15. Kartvelishvili N. A. On the Theory of Long-Term River Flow Regulation. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydrotechnics*. Leningrad. 1958. Vol. 58. P. 231–232.
16. Kartvelishvili N. A. Theory of Probability Processes in Hydrology and River Flow Regulation. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 192 p.
17. Bolgov M. V. Markov Processes in the Problem of Forecasting the Water Level of a Closed Reservoir. *Meteorology and Hydrology*. 2005. No. 11. P. 74–85.
18. The Problem of Territorial Redistribution of Water Resources. Ed. by G. V. Voropaev and D. Ya. Ratkovich. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. Institute of Water Problems, 1985. 504 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 19.08.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 01.09.2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.

УДК 332.122 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-20-45*

Оригинальная статья / Original paper

Водообеспеченность и качество водных ресурсов как детерминанты промышленной безопасности регионов Юга России

Л. Г. Матвеева[1], Н. А. Косолапова[1], М. В. Папушенко[2], М. М. Головачева[3]

lmatveeva@sfedu.ru

[1] *Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *АНО «Федеральный центр компетенций в сфере производительности труда», Департамент производительности труда и улучшения условий ведения бизнеса, Москва, Россия*
[3] *Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В числе важнейших условий достижения технологического лидерства России является промышленная и водная безопасность, высокая корреляция и реципрокное влияние которых формируют основу экологической безопасности, а состояние водообеспеченности и качества воды выступают внутренними вызовами устойчивости. Достаточная водоообеспеченность и высокое качество водных ресурсов являются необходимыми условиями стабильного функционирования индустрии. **Методы.** Для разработки теоретико-концептуального базиса и инструментария оценки состояния водных ресурсов логика принятия решений в сфере промышленной безопасности, учитывая комплементарность связей индустриального и водохозяйственного секторов, представлена как последовательное расширение фокуса управления: от рационального принятия решений – к процессному, системному и ресурсно-комплементарному подходам и далее – к цифровой трансформации управления на основе данных, моделей и знаний. **Результаты.** Построена теоретико-концептуальная рамка исследования и проведен поиск путей и механизмов преодоления возможного возникновения ограничивающего эффекта в системе «промышленность – водные ресурсы», осуществлено развитие теории промышленной и экологической безопасности в сопряжении с концепцией рационального водопотребления. Подчеркнуто методологическое разнообразие подходов к оценке водообеспеченности и предложено использование нейросетевого моделирования для определения потерь на дополнительное испарение с водоемов бассейнов рек Дон, Кубань, Самур, Терек. Определено, что полученные значения потерь вкупе с высокой нагрузкой на водные объекты этих территорий становятся одним из основных дестабилизирующих факторов, оказывающих влияние на промышленный сектор макрорегиона через лимитирование гарантированного водозабора, ухудшение качества технической воды, снижение пропускной способности судоходства и рост экологических ограничений для сбросных вод. Анализ качества водных ресурсов Юга России выявил технологические и правовые риски для промышленной безопасности. Предложена концептуальная модель, опирающаяся на три предпосылки: реципрокная связь промышленной

© Косолапова Н. А., Матвеева Л. Г., Папушенко М. В., Головачева М. М., 2026

и экологической безопасности; двусторонность связи водных ресурсов и промышленности; использование уточненных оценок водообеспеченности с учетом дополнительных потерь на испарение с водной поверхности, качества водных ресурсов и специфики региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промышленная безопасность, водопотребление, водообеспеченность, качество водных ресурсов, комплементарность связей в системе «промышленность – водные ресурсы», регионы Юга России.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Матвеева Л. Г., Косолапова Н. А., Папушенко М. В., Головачева М. М. Водообеспеченность и качество водных ресурсов как детерминанты промышленной безопасности регионов Юга России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 20–45; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-20-45; EDN: SSZXXU

Water supply and quality of water resources as determinants of regional industrial safety of the South of Russia

Lyudmila G. Matveyeva[1], Natalya A. Kosolapova[1], Maxim V. Papushenko[2], Maria M. Golovacheva[3]

lmatveeva@sfedu

[1] *Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*
[2] *ANO "Federal Competence Center in the field of labor productivity", Department of productivity there and improving business conditions, Moscow, Russia*
[3] *Russian Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Among the most important conditions for achieving technological leadership in Russia are industrial and water safety, the high correlation and reciprocal influence of which form the basis of environmental safety, and the state of water supply and water quality are internal challenges to sustainability. Sufficient water supply and high quality of water resources are the necessary conditions for the stable functioning of the industry. **Methods.** To develop a theoretical/conceptual basis and tools for assessment of the water resources status the logics of decision making in the sphere of industrial safety, bearing in mind complimentary nature of ties between industrial and water sectors, is presented as the consecutive widening of the management "focusing"; from rational taking a decision to the process, system and resource-complimentary approaches, and further to digital transformation of management based on data, models, and knowledge. **Results.** The theoretical and conceptual framework of the study was built and the search for ways and mechanisms to overcome the possible occurrence of a limiting effect in the system "industry-water resources, the development of the theory of industrial and environmental safety in conjunction with the concept of rational water consumption was carried out. The methodological diversity of approaches to assessing water availability was emphasized and the use of neural network modeling to determine losses for additional evaporation from reservoirs of the Don, Kuban, Samur, Terek river basins was proposed. It was determined that the obtained values of losses, coupled with the high load on the water bodies of these territories, become one of the

main destabilizing factors affecting the industrial sector of the macro/region through limiting the guaranteed water intake, deterioration in the quality of technical water, a decrease in shipping capacity and an increase in environmental restrictions for wastewater. Analysis of the quality of water resources in the South of Russia revealed technological and legal risks for industrial safety. A conceptual model based on three prerequisites is proposed: a reciprocal relationship between industrial and environmental safety; bilateralism between water and industry; the use of updated estimates of water availability, taking into account additional losses on evaporation from the water surface, the quality of water resources and the specifics of the region.

KEYWORDS: industrial safety, water consumption, water supply, quality of water resources, complementarity of relations in the system of industry-water resources," regions of the South of Russia.

FOR CITATION: Matveyeva L. G., Kosolapova N. A., Papushenko M. V., Golovacheva M. M. Water supply and quality of water resources as determinants of regional industrial safety of the South of Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 5. P. 20–45; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-20-45; EDN: SSZXXU

ВВЕДЕНИЕ

В Стратегии национальной безопасности России, ориентированной на достижение суверенитета и технологического лидерства нашей страны в мировом экономическом пространстве, ведущая роль отводится промышленности – ключевому драйверу развития остальных отраслей и всей российской экономики. Устойчивое высокотехнологичное развитие, стратегическая безопасность промышленности составляют ключевой индикатор конкурентоспособности России. Выход на передовые позиции ее приоритетных отраслей обеспечит дальнейшее укрепление обороноспособности страны, достижение национальных целей развития, создаст условия для повышения международного авторитета Российской Федерации и привлекательности сотрудничества с ней для других государств[1]. Базовые отрасли отечественной индустрии, в том числе гидроэнергетика и ее водохозяйственный комплекс, выполняют системообразующие функции в отечественной системе хозяйствования, обеспечивают экономику необходимыми средствами производства и первичными энергоресурсами, формируют условия для ее стабильного функционирования, а также оказывают существенное влияние на устойчивость бюджетных и инвестиционных потоков.

Роль промышленности и гидроэнергетики выходит далеко за пределы этих отраслей, поскольку они, выполняя отмеченные функции, создают «энергетическую основу» развития всех территорий страны. Это особенно наглядно проявляется в условиях новой глобализации, которая на текущем этапе является не только геополитическим и геоэкономическим продуцентом происходящих трансформаций в мировой экономике, но и продуктом цифровой революции, определяя новые парадигмы развития отечественной индустрии. В их числе –

1 Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021 г. № 400.

базирующаяся на цифровых технологиях концепция промышленной и энергетической (в том числе экологической) безопасности как важнейшее условие национальной защищенности и стабильности. При этом очевидна высокая корреляция промышленной и экологической безопасности, а также их реципрокное влияние: промышленная безопасность формирует основу экологической безопасности, в рамках которой состояние водообеспеченности и качества водных ресурсов выступают внутренними вызовами экологической устойчивости. С другой стороны, достаточная водообеспеченность и высокое качество водных ресурсов являются необходимым условием стабильного и безопасного функционирования индустриального комплекса страны и ее регионов.

Высокая водообеспеченность более свойственна северным и дальневосточным регионам Российской Федерации, в то время как в регионах Юга России коэффициенты водообеспеченности экономики принимают минимальные значения [1]. С учетом данного положения становится очевидным повышение риска дестабилизации промышленной безопасности. Основная нагрузка на водные ресурсы южных регионов производится в аграрном секторе, поэтому увеличение уровня обеспеченности водными ресурсами южного промышленного узла возможно именно за счет повышения эффективности использования воды в сельском хозяйстве, что отмечается в публикациях не только российских, но и ряда зарубежных ученых [2]. Поскольку промышленность является одним из главных по объему потребителей воды, дефицит водных ресурсов выступает лимитирующим фактором производственных мощностей и причиной снижения технологической надежности объектов, в особенности в маловодные периоды. Как следствие, возникает определенная «уязвимость» объектов промышленности, а обостряющийся в маловодные периоды конфликт интересов субъектов различных секторов экономики становится причиной усугубления данной проблемы.

Осложнение описанной проблемы возникает также за счет ухудшения качественного состава водных ресурсов. Согласно данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по оценке качества поверхностных вод Российской Федерации [3], по состоянию на 2024 г. качество воды регионов Юга России характеризуется выраженной территориальной неоднородностью и разнообразием загрязнителей. Подчеркивается высокая степень загрязненности (5-й класс качества – «экстремально грязная» вода) в Ростовской области, а низкая, с максимальным количеством створов в регионе, 1-го класса качества («условно чистая» вода), характерна для Республики Крым и некоторых водных объектов Краснодарского края, Карачаево-Черкесской Республики и Республики Северная Осетия – Алания. Такая территориальная неоднородность в области качества воды регионов Юга России становится на общем фоне угрозой промышленной безопасности в связи с тем, что для более развитых промышленных регионов характерно низкое

качество воды, которое влечет за собой повышение затрат на водоподготовку с целью достижения нормативов, требуемых технологическими процессами, а также ограничения в выборе современных технологий, напрямую связанных с качеством воды, повышенные риски аварий и простоев, возможных по причине возникновения коррозии оборудования, сложность соблюдения нормативов по составу стока, снижение инвестиционной привлекательности [4]. А для регионов с более высоким классом качества воды, в свою очередь, характерны более сложные условия (климатические, рельефные) для формирования масштабных промышленных комплексов, следствием чего может стать замедление промышленного развития регионов Юга России.

В данном контексте следует отметить, что к числу основных механизмов реализации государственной политики в сфере обеспечения экологической безопасности относится не только соответствующая оценка проектов и программ развития Российской Федерации и ее регионов, но и проведение экспертизы промышленной безопасности[2] и комплексная модернизация производственно-технологической базы отраслей реального сектора экономики с учетом требований промышленной и экологической безопасности[3]. Таким образом, на государственном уровне, во-первых, подчеркивается тесная связь промышленной и экологической безопасности; во-вторых, демонстрируется, что модернизация производственно-технологической базы отраслей реального сектора экономики, которая необходима для их устойчивого роста, реализуется именно с учетом требований промышленной и экологической безопасности.

В соответствии с этим логика принятия решений в сфере промышленной безопасности, учитывая очевидную комплементарность связей индустриального и водохозяйственного секторов экономики, может быть представлена как последовательное расширение так называемого фокуса управления: от рационального и точного принятия решений – к классическим процессному, системному и ресурсно-комплементарному подходам и далее – к цифровой трансформации управления на основе данных, моделей и знаний. При этом именно цифровизация стала новым витком этой эволюции: она перестраивает связи между ранее сформировавшимися подходами, переводя управление от локальной автоматизации к сквозной управляемости процессами на основе данных [5].

В ряде публикаций последнего времени отмечается, что реализация перехода водохозяйственных комплексов к новым индустриальным формам на основе масштабной цифровизации приобретает особое значение в современных реалиях, когда гидроэнергетика, выступая компонентом и динамическим профилем индустриального ландшафта региона [6], выполняет важные функции в структурной модернизации региональных экономик, в наращивании потен-

2 Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года».

3 Указ Президента Российской Федерации от 13.05.2017 г. № 208 «О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года».

циала высокотехнологичности и обеспечении сбалансированности развития за счет использования возможностей циркулярных бизнес-моделей [7]. Следует подчеркнуть, что неотъемлемой частью указанного перехода также выступает состояние водных ресурсов, поскольку их исчерпаемость и неоднородность оказывают прямое влияние на технологические режимы промышленного водопользования, бесперебойность функционирования промышленных комплексов и повышение устойчивости к внешним шокам. В императивах достижения технологического лидерства России и ее регионов роль высокотехнологичных предприятий промышленности концептуализируется преимущественно через призму их особого стратегического значения как ключевых агентов структурной трансформации экономики: именно они формируют основу импортозамещающего контура в промышленности, обеспечивают рост экспортного потенциала и создают мультипликативный эффект для смежных отраслей [8]. Функциональная нагрузка высокотехнологичных предприятий в новой модели экономики не ограничивается производством наукоемкой продукции, а цифровизация промышленности выступает фактором изменения пространственно-отраслевой структуры региона, при этом высокотехнологичные предприятия играют роль точек диффузии технологических инноваций в смежные производства. Для пространственно-отраслевой трансформации состояние водных ресурсов может стать критическим лимитом, обладающим двойственностью воздействия, выступая, с одной стороны, возможным стимулом, а с другой стороны, вероятным ограничителем. Стимулирующий эффект проявляется при внедрении водосберегающих технологий, в том числе в агарном и промышленном секторах, и при переходе к циркулярным моделям водопользования; ограничивающий эффект возникает при дефиците воды с низкой степенью загрязненности и приводит к удорожанию водоподготовки, что снижает или эффективность действующих высокотехнологичных мощностей, или инвестиционную привлекательность создания новых производств.

По мнению авторов статьи, в данном контексте методологический и практический интерес представляет научно обоснованный поиск путей и механизмов преодоления возможного возникновения ограничивающего эффекта, что напрямую связано с пониманием водообеспеченности и качества водных ресурсов как ключевых детерминант промышленной безопасности регионов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленные выше многогранность и полиаспектность проблематики промышленной безопасности через призму приоритетной роли водных ресурсов региона объясняют междисциплинарный характер исследования, базирующийся на совместном непротиворечивом использовании целого спектра взаимосвязанных теорий и концепций. В их числе: теории пространственно-

го развития и размещения производительных сил, территориального и промышленного развития, ресурсоэффективности, структурной трансформации региональных систем, новая экономическая география, концепция модернизации промышленного производства на основе инноваций и цифровизации, институциональная экономика и др., что предопределено высочайшим приоритетом стратегического развития промышленности и необходимостью ее регионального регулирования как иерархически вложенной системы, определяющей включенность субъектов в промышленную политику страны. При этом, по мнению большого числа ученых (А. Е. Косолапов, Н. А. Косолапова, Л. Г. Матвеева, Е. В. Каплюк и др.), промышленный сектор региона необходимо рассматривать в совокупности с природно-климатическими факторами, в том числе водными ресурсами территории. Современные работы в области взаимоувязанного исследования промышленного и водного секторов региона рассматривают их как взаимозависимую систему, в которой управленческие решения в одном секторе порождают эффекты перелива в сопряженных секторах водного хозяйства, при этом фокус делается на поиске компромиссов между данными секторами. В развитие этого авторы статьи выдвигают и проверяют гипотезу о том, что промышленная безопасность достигается через формирование устойчивой, целеориентированной на эффективное использование ограниченных водных ресурсов конфигурации связей между этими секторами региональной экономики. В рамках данной концепции рассматривается совместное применение системного, ресурсно-целевого, а также ресурсно-комплементарного подхода и концепции резильентности для построения типологии управленческих режимов, обеспечивающих максимальный синергетический эффект, и выявления лимитирующих факторов достижения устойчивости промышленной безопасности региона.

Существующая в методологическом пространстве проблематика рационального использования водных ресурсов региона в концептах промышленной безопасности, а также концептуальная детерминация взаимоувязанного и взаимосопряженного развития промышленной и водной экосистем региона обеспечивается, таким образом, взаимосвязью механизмов и стратегий их развития на разных иерархических уровнях.

Промышленное производство оказывает значительное влияние на уровень водопотребления за счет большей водоемкости по сравнению с другими видами экономической деятельности, но при этом имеет высокий потенциал энергосбережения, который зависит от используемых технологий. Помимо анализа воздействия технологических изменений, стоит вопрос о значимости производительности труда в промышленности и структурных изменений в индустриальной сфере в совокупном влиянии этих факторов на интенсивность и эффективность водопотребления. Исторически сложившаяся неравномерность отраслевой структуры экономики регионов только увеличивает акту-

альность подобных исследований. В данном контексте значимость указанных задач определяется влиянием политики водообеспечения не только на конкурентоспособность отраслей индустрии и промышленную безопасность, но и на сбалансированность водоресурсного, промышленного и социально-экономического развития региона.

Отметим, что взаимосвязь, взаимообусловленность и взаимовлияние промышленной и водной экосистем определяют важность специального исследования проблемы управления эффективным водоресурсным обеспечением промышленного развития региона в стратегических императивах инновативации и цифровизации. Результаты многочисленных исследований позволяют констатировать, что главные причины существующих проблем в системе водоресурсного обеспечения промышленного развития региона состоят в следующем: прежде всего, это несоответствие действующего экономического механизма распределения и использования водных ресурсов в данной сфере, финансовых возможностей водопользователей и в целом системы управления использованием и охраной водных ресурсов их фактическому потенциалу, а также несогласованность стратегий водопользования промышленных систем разных иерархических уровней.

Спектр отраслевой принадлежности предприятий – потребителей воды в масштабах региона является весьма разнообразным и в целом соответствует специализации региона, а также уровню развития в нем производственных и инфраструктурных секторов регионального хозяйства. В зависимости от политики промышленного развития на региональном уровне, может оказаться необходимой приоритетная поддержка определенных производств как базиса эффективного функционирования всей воспроизводственной системы региона.

В текущем аспекте рациональность водопользования выражается в достижении наибольшего соответствия между существующими потребностями и фактическим обеспечением водными ресурсами хозяйствующих субъектов. В стратегическом аспекте важное значение приобретает сложившаяся динамика отраслевой водоемкости в регионе, поскольку определяет ключевые ориентиры для прогнозирования будущих потребностей субъектов региона в водных ресурсах.

Верифицированный в процессе исследования высокий уровень водоемкости промышленного производства, характерный для российских предприятий в современных условиях хозяйствования, детерминирует необходимость повышения рациональности водопользования для укрепления конкурентных позиций региональных экономик. Критический уровень нагрузки на водные ресурсы является сдерживающим фактором социально-экономического развития территории, одновременно создавая угрозу для экологической и промышленной безопасности. В последние годы все большее количество ученых в изучении проблематики рационального распределения и использования водных

ресурсов особый акцент делают на необходимости использования показателя водоемкости ВРП в региональном стратегировании. Это объясняется тем, что данный подход позволяет оценить уровень использования водосберегающих технологий в регионе и возможность интенсификации факторов регионального промышленного производства при сохранении целостности водохозяйственных систем.

Таким образом, учитывая объективно сложившуюся сложность современной системы водопользования и необходимость реализации различных подходов к управлению водными ресурсами, адаптированных к специфике конкретного водного бассейна и промышленной экосистемы региона, требуется совершенствование инструментария поддержки принятия решений в данной сфере.

Авторами статьи предлагается использование классических подходов к количественной оценке вкупе с современными методами нейросетевого моделирования, предоставляющими возможность уточненной и регулярной оценки водообеспеченности регионов Юга России.

Полученные с использованием нейросетевых моделей по определению водной поверхности на космических снимках (сверточная нейронная сеть DeepWaterMap) и площадей водных объектов (трансформерная нейронная сеть EfficientNet – MANet) значения позволяют определять потери на дополнительное испарение с водоемов [9]. Определение площадей водоемов осуществлено с использованием данных дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов серии Landsat для бассейнов рек Дон, Кубань, Самур и Терек, относящихся к исследуемому макрорегиону. Выбор данного источника обусловливается регулярностью проведения съемок и высокой площадью покрытия, при этом для полного покрытия бассейнов указанных рек использовались данные за 2018–2024 гг., позволяющие полностью охватить исследуемую территорию. Чтобы оценить максимально возможные потери на дополнительное испарение с водной поверхности, были взяты максимальные площади водоемов при наличии пересечения. Для расчета дополнительных потерь на испарение с поверхности водоемов отобраны данные о среднем многолетнем слое испарения с водной поверхности за теплый период с 5-го по 9-й месяц включительно по испарителю ГГИ-3000 [10], о среднем многолетнем слое скорректированных значений осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов по данным наблюдений за аналогичный период[4]. Выбор данного временного периода обусловливается тем, что объем испарений в холодные месяцы (с ноября по март) либо пренебрежимо мал, либо его учет требует специальных методик (например, для снежного покрова), которые не входят в стандартные расчеты для водоемов.

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

С использованием геоинформационных программных средств выполнено интерполирование значений среднего многолетнего слоя испарения с водной поверхности и скорректированных значений осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов по методу обратного взвешенного расстояния. Для водоемов бассейна рек Дон, Кубань, Терек, Самур с учетом средней площади зеркал водоемов, идентифицированных нейронной сетью, определен объем осадков и испарения с водной поверхности. Это реализовано с помощью алгоритма, позволяющего по координатам присваивать каждым выделенным бассейнам рек значения скорректированных осадков и испарений с водной поверхности. Shape-файлы с территориями бассейнов и интерполяционными значениями показателя (скорректированные осадки, испарение с водной поверхности) накладываются по координатам слоями друг на друга. Значение показателя присваивается бассейну при пересечении. В случае, когда бассейн пересекает несколько значений показателя, присваивается его среднее значение. На основе полученных данных рассчитаны потери на дополнительное испарение с водной поверхности по площадям зеркал при их максимальном наполнении и продемонстрировано перспективное влияние выявленных потерь на промышленный сектор регионов Юга России.

Для характеристики качества водных ресурсов регионов Юга России использовались данные ежегодника «Качество поверхностных вод Российской Федерации» [3], на основе которых оценено состояние качества водных ресурсов регионов Юга России и выявлены возможные риски промышленной безопасности.

По результатам эмпирического анализа авторами предложена концептуальная модель взаимосвязи качества водных ресурсов, водообеспеченности и промышленной безопасности регионов Юга России.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В концептах принятого авторами данного исследования ресурсно-комплементарного подхода конкурентоспособность региональной экономики все в меньшей степени определяется доступом к наличным природным ресурсам, в частности к водным, и все в большей – способностью их генерировать и интегрировать с технологическими инновациями, что продуцирует синергетический эффект. Л. В. Глезман обосновывает, что именно технологически сложные производства в логике ресурсной комплементарности с природными ресурсами определяют пространственно-отраслевую специализацию региона и выступают центрами притяжения квалифицированных кадров и инвестиций [11].

Промышленность Юга России – это мощный агропромышленный, энергетический и машиностроительный комплекс. Главные роли в нем играют пищевая индустрия, сельхозмашиностроение, топливно-энергетический сектор, а также металлургия и производство стройматериалов. Совокупная выручка 300 крупнейших промышленных предприятий Юга России с 2022 по 2025 г.

выросла на 10 %, однако их суммарная прибыль сократилась более чем вдвое. Индустрия региона демонстрирует сдержанную динамику и высокую зависимость от агропромышленного комплекса. Перерабатывающая промышленность и сельское хозяйство остаются главными драйверами стабильности для южных регионов, включая Краснодарский край.

Наиболее крупными водопользователями Юга России, представляющими отчетность об использовании воды в форму 2-ТП (водхоз), являются предприятия электроэнергетики, нефтедобычи, химической промышленности и агропромышленного комплекса (табл. 1).

Таблица 1. Объемы использования воды крупными предприятиями-водопользователями[5]
Table 1. The volumes of water use by major enterprises water-users

Название предприятия	Объем воды, млн м³	
	Забранной	Сброшенной
ООО «ЛУКОЙЛ-Экоэнерго» (Белореченская ГЭС)	1768,15	0
Филиал ПАО «ОГК-2» – Ставропольская ГРЭС	1613,22	1612,82
Филиал ПАО «РусГидро» – «Каскад Кубанских ГЭС» (по СК)	966,61	0
ООО «ЛУКОЙЛ-Кубаньэнерго»	162,5	157,49
Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» – «Ростовская атомная станция»	120,26	55,72
АО «КАУСТИК»	58,62	42,97
ООО «АПК АСТРАХАНСКИЙ»	16,67	0,6
Южный филиал ООО «Газпром энерго» (Южный ФГПЭ)	15	3,99
ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть»	15,97	12,94

Например, в Ростовской области – одном из ведущих регионов Юга России (рис. 1), характеризующемся, как было отмечено выше, высоким водопотреблением в силу специфики аграрного производства, – по итогам 2025 года обрабатывающие производства сохраняли ведущие позиции в структуре экономики (табл. 2).

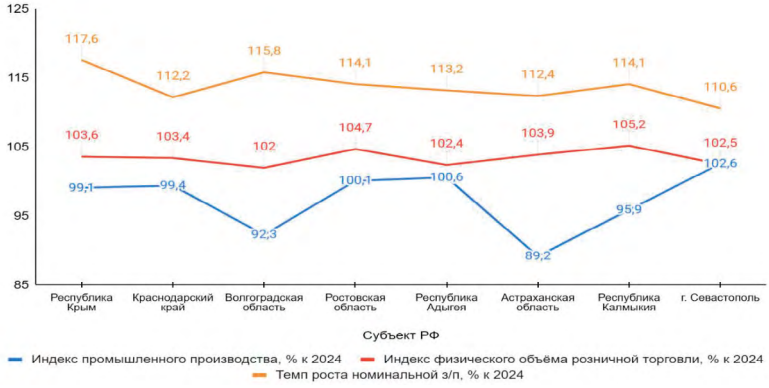


Рис. 1. Сравнительные показатели промышленного развития субъектов ЮФО, январь – декабрь 2025 г.[6]

Fig. 1. Comparative indicators of the South Federal District constituent members' industrial development, January – December, 2025

5 Составлено авторами на основе данных формы 2-ТП (водхоз).
6 Составлено авторами по данным Росстата.

Таблица 2. Индексы производства и объем отгруженной продукции по отдельным высокотехнологичным видам деятельности Ростовской области, январь – декабрь 2025 г.[7]

Table 2. Indices of production and the volume of factory shipments for some high-tech types of activities of Rostov Oblast, January – December, 2025

Вид деятельности	Индекс производства, % к 2024 г.	Объем отгруженной продукции, млн руб.	% к 2024 г.
Обрабатывающие производства, всего	100,7	1 492 320,2	95,9
Производство прочих транспортных средств и оборудования	114,6	160 667,7	113,7
Производство машин и оборудования	106,4	105 572,0	81,5
Производство электрического оборудования	104,8	57 536,2	112,3
Производство компьютеров, электронных и оптических изделий	83,0	45 059,8	94,9

Ростовская область входит в число регионов ЮФО с положительной динамикой промышленного производства (100,1 %) и наибольшим приростом розничного товарооборота (104,7 %), что свидетельствует об относительной устойчивости экономики. Вместе с тем темп роста заработной платы (114,1 %) уступает Республике Крым (117,6 %) и Волгоградской области (115,8 %) и в контексте конкуренции за технологические кадры создает дополнительное давление на высокотехнологичные предприятия региона.

Инновационная составляющая региональной промышленности также демонстрирует положительную динамику: объем производимой инновационной продукции составил 240,0 млрд руб., удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации, – 50,3 %[8].

Вместе с тем анализ данных показателей выявляет ряд структурных ограничений (табл. 3). По сравнительным данным в разрезе субъектов Южного федерального округа Ростовская область в 2025 г. входит в группу регионов с индексом промышленного производства выше 100 % (100,1 %) и опережающим темпом роста заработной платы (113,9 % против среднего по ЮФО 113,4 %)[7].

Таким образом, высокотехнологичное производство формирует значимый вклад в конкурентоспособность экономики Ростовской области и Юга России в целом.

7 Экономические и социальные индикаторы развития Ростовской области в январе – декабре 2025 года / Росстат. Ростов-на-Дону, 2026. [Электр. ресурс]. URL: https://61.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/i2608033.pdf

8 Отчет о реализации государственной программы Ростовской области «Экономическое развитие и инновационная экономика» за 2025 год. [Электр. ресурс]. URL: https://www.donland.ru/result-report/2808/

Таблица 3. Структурные ограничения высокотехнологичного сектора Ростовской области

Table 3. Structural limitations of the high-tech sector of Rostov Oblast

Параметр	Фактическое состояние	Выявленное ограничение
Структура спроса	Производство транспортных средств и оборудования (ОПК) – рост 114,6 %; производство компьютеров и электроники – снижение до 83,0 %	Зависимость от оборонного заказа при слабости гражданского высокотехнологичного сегмента
Экспортный потенциал	Объем несырьевого неэнергетического экспорта – 4800 млн долл. США при плане 8720 млн долл. США	Недовыполнение экспортных показателей на 45% вследствие снижения экспорта продовольствия и слабости промышленного экспорта
Цифровая зрелость отраслей	Показатель 68,2 % достигнут преимущественно за счет госуправления и социальной сферы	Неравномерное распределение цифровой зрелости между отраслями и размерными группами предприятий
Инновационная активность	50,3 % организаций осуществляли технологические инновации	Разрыв между крупными предприятиями ОПК и средним технологическим бизнесом по уровню инновационной активности

Таблица 4. Сопоставление уровня технологической интенсивности и динамики производства по высокотехнологичным видам деятельности Ростовской области, 2025 г.[9]

Table 4. Comparison of the technological intensity levels and production dynamics in terms of high-tech types of activities of Rostov Oblast, 2025

Вид деятельности	Среднемесячная з/п, руб.	Индекс производства, % к 2024	Объем отгрузки, млрд руб.	Динамика объема, % к 2024
Производство компьютеров, электроники и оптики	100 616,8	83,0	45,1	94,9
Производство прочих транспортных средств	96 277,1	114,6	160,7	113,7
Производство машин и оборудования	91 660,4	106,4	105,6	81,5
Производство электрического оборудования	90 728,1	104,8	57,5	112,3
Производство химических веществ	85 392,3	116,8	59,2	109,0
Обрабатывающие производства, всего	84 275,9	100,7	1 492,3	95,9

Анализ табл. 4 позволяет зафиксировать несколько эмпирически значимых закономерностей и перенести выявленные закономерности на отраслевую структуру водопотребления и водоотведения. Во-первых, производства с наиболее высоким уровнем оплаты труда (компьютеры и электроника – 100 616,8 руб.) демонстрируют отрицательную динамику физического объема выпуска (83,0 %), что свидетельствует о циклической, а не структурной природе их производственной активности и ее обусловленности государственным заказом, и, как следствие, минимизации антропогенной нагрузки на водные объекты. Во-вторых, наиболее устойчивый рост показывают сегменты с диверсифицированным спросом: химическое производство (116,8 %) и производство транспортных средств (114,6 %), что сопряжено с увеличением водо-

9 Составлено авторами по данным Росстата.

забора и с повышением рисков сбросов высокотоксичных загрязнителей. Так, секторальный экономический рост в какой-то мере конфликтует с показателями состояния водных ресурсов, превращая его мониторинг в критический фактор устойчивости промышленных кластеров, т. к. исчерпание потенциала ассимиляционного потенциала водных объектов нивелирует позитивные макроэкономические эффекты и формирует долгосрочные техногенные риски.

К оценке водообеспеченности существует ряд подходов, включающих в себя рассмотрение данного показателя через призму территориального деления, т. е. водообеспеченность территорий, и через призму потребительских нужд, т. е. водообеспеченность населения, также выделяется водообеспеченность экономики, под которой понимается «отношение ресурсов речного стока к забору пресных вод» [1]. Зачастую исследователи прибегают к использованию классического математического инструментария, статистического анализа, критериального подхода и картирования, а источниками данных для оценки служат сведения Федеральной службы государственной статистики, Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, научно-исследовательских институтов и бассейновых водных управлений и материалы дистанционного зондирования Земли. При этом анализ отечественных и зарубежных источников позволил выявить многоаспектность методов оценок водообеспеченности.

Так, классическим способом являются расчеты показателей водообеспеченности территорий как отношение количества ресурсов к площади рассматриваемой территории и водообеспеченности населения как интегральной характеристики, определяющейся по количеству водных ресурсов по отношению к численности населения в исследуемом регионе [12]. Первый показатель не способен отразить реальный уровень обеспеченности водными ресурсами регионов Юга России в связи с отсутствием учета географических и климатических характеристик, а также особенностей отраслевого водопотребления. Водообеспеченность территорий может привести к завышенным представлениям о ресурсном благополучии в сфере водного хозяйства на Юге России за счет наличия регионов с горной местностью, в то время как основные индустриальные кластеры локализованы в регионах с равнинной местностью и высокой антропогенной нагрузкой. В связи с этим многие исследователи прибегают к использованию такого удельного показателя, как водообеспеченность населения, который коррелирует с производственным водопотреблением и позволяет ранжировать регионы Юга России по водообеспеченности. Вместе с тем данный показатель не может рассматриваться как универсальный предиктор, т. к., во-первых, не учитывается сезонность, что особенно значимо в оценке водообеспеченности, поскольку присутствуют существенные различия в площадях водоемов в период половодья и межени; во-вторых, в условиях глобального потепления, порождающего повышение потерь на

дополнительное испарение, и высокого значения риска водного стресса как одного из климатических рисков [9] достигаются завышенные представления о доступности водных ресурсов. Показатель водообеспеченности населения также дополняется расчетом эффективности и устойчивости водообеспеченности [13], формируя многоуровневую систему оценок, дающую возможность одновременной оценки по нескольким независимым, но взаимосвязанным параметрам, которая определяет положение регионов Юга России по уровню водообеспеченности.

В научной среде получили особое распространение и такие способы оценки водообеспеченности, как использование геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли [14], позволяющие осуществлять пространственное моделирование элементов водного баланса, включая объемы осадков, испарения и стоков, с высокой пространственной дискретностью. Индикаторы вегетационных индексов (NDVI, NDDI) и метеорологические индексы засушливости (SPI, AI) являются дополнением и позволяют уточнить водообеспеченность в семиаридных регионах Российской Федерации, часть из которых входит в регионы Юга России. Зачастую сегодня используется именно многокритериальный подход, включающий в себя интеграцию гидрологических, климатических, географических и социально-экономических измерений, что особенно актуально для южнороссийского макрорегиона. Объединение данных подходов и внедрение современного инструментария нейросетевого моделирования предоставит возможность уточнения водообеспеченности данных регионов в режиме оперативного мониторинга, что позволит сократить временные затраты, повысить адаптивность принимаемых управленческих решений и, как следствие, снизить риски для промышленной безопасности.

Описываемое методологическое разнообразие может привести к неоднозначной трактовке реального состояния водообеспечения регионов Юга России и вызвать принятие неэффективных управленческих решений, что напрямую отразится на состоянии промышленного сектора. Во многих исследованиях недостаток водных ресурсов связывают с негативным влиянием промышленности, которая как один из крупнейших участников водохозяйственного комплекса потребляет большое количество пресной воды, тем самым усугубляя проблему вододефицита, и способствует ухудшению качества водных ресурсов. Данный аспект невозможно не учитывать, однако стоит заметить, что присутствует другая взаимосвязь: угроза промышленной безопасности порождается вододефицитом и неудовлетворительным качеством воды в регионах Юга России. Это приводит к ухудшению экстенсивных и интенсивных факторов производства. В части экстенсивных факторов происходит сокращение объемов водных ресурсов как сырья, рост капиталовложений, не связанных с улучшением основных технологий, а направленных на поддержание минимального уровня водоснабжения. Воздействие на интенсивные факторы осуществля-

ется через снижение эффективности технологических процессов, в частности их замедление, ухудшение свойств готовой продукции, торможение интенсивного обновления основных фондов по причине повышения физического износа оборудования и увеличение ресурсоемкости производства. В связи с этим можно прийти к выводу о том, что в исследуемом макрорегионе существует угроза формирования деструктивного контура промышленного сектора через водные ресурсы. Количественная недостаточность в виде вододефицита и неудовлетворительные качественные характеристики в виде высокой степени загрязненности становятся не просто операционными издержками, а мощным дестимулятором интенсивного пути развития промышленного сектора.

Неоднородность у регионов Юга России наблюдается и в уровне нагрузки на водные объекты. Так, бассейны рек Дон и Кубань характеризуются очень высоким и критическим уровнем нагрузки на водные объекты, и на данной территории имеет место серьезный дефицит воды [15], а бассейны рек Самур и Терек имеют более дифференцированную нагрузку на водные объекты за счет специфики горного рельефа, но при этом обладают высокой природной уязвимостью [16]. Это, в свою очередь, порождает уязвимость промышленной инфраструктуры, требует повышения мер эффективности водопотребления в бассейнах рек Дон и Кубань, что реализуемо через повышение эффективности водопотребления в аграрном секторе и снижение уровня конкуренции участников водохозяйственных комплексов и приводит к необходимости в особом акценте на сезонности как для бассейнов рек Дон и Кубань, так и в особенности для бассейнов рек Самур и Терек, обусловленном ливневым режимом питания рек и водосборов с низкой буферной способностью. По результатам расчетов изменения площадей в бассейнах рек Дон, Кубань, Самур и Терек с использованием нейронных сетей DeepWaterMap и EfficientNet – MANet [17] на основе данных космических снимков Landast-8 и Landast-9 по состоянию на 2018–2024 гг. наблюдается снижение площадей водоемов (с площадью зеркала > 0,025 км², поскольку данная площадь является незначительной величиной в контексте моделирования водохозяйственных балансов) в меженный период по сравнению с периодом половодья (табл. 5).

Таблица 5. Изменение площадей водоемов в бассейнах рек Дон, Кубань, Самур, Терек
Table 5. Changing of the water bodies' areas in the Don, Kuban, Samur, and Terek rivers' basins

Бассейн реки	Изменение, %
Дон	−14
Кубань	−59,76
Самур	−32,36
Терек	−7,56

На основе полученных площадей водоемов были определены потери на дополнительное испарение с водоемов (табл. 6).

Таблица 6. Потери на дополнительное испарение с водоемов в бассейнах рек Дон, Кубань, Самур и Терек за теплый период (5–9-й месяцы)

Table 6. Losses for additional evaporation from water bodies in the Don, Kuban, Samur, and Terek rivers' basins over the warm period (5th – 9th months)

Бассейн реки	Потери на дополнительное испарение с водоемов, млн м^3
Дон	2800,8
Кубань	666,23
Самур	9,61
Терек	95,8

При этом максимальные объемы потерь на дополнительное испарение приходятся с водной поверхности рек. Данное уточнение позволяет прийти к выводу о том, что появляется риск повышения потерь воды и недостижение ею водозаборных сооружений в бассейнах рек Дон и Кубань, в то время как для Самура и Терека рассчитанные значения оказывают на это минимальное влияние в связи с особенностями ландшафта. В дополнение к упомянутой ранее высокой нагрузке на водные объекты в бассейнах рек Дон и Кубань полученные значения потерь на дополнительное испарение с водоемов становятся одним из основных дестабилизирующих гидрологических факторов, оказывающих системное влияние на промышленный сектор макрорегиона. Это приводит к лимитированию гарантированного водозабора, ухудшению качества технической воды, снижению пропускной способности судоходства и росту экологических ограничений для сбросных вод. Подобное влияние можно охарактеризовать как экологическое и инфраструктурное, способствующее увеличению операционных расходов и снижению надежности водохозяйственного обеспечения промышленного сектора Юга России в теплый сезон.

К еще одной детерминанте промышленности безопасности Юга России относится качество водных ресурсов, отличающееся высокой степенью загрязнения. Наблюдение за качеством водных ресурсов не обладает регулярным характером: данные поступают в закрытый контур сегмента «Государственный мониторинг водных объектов» государственной информационной системы «Цифровая платформа «Водные данные» не в полном объеме и несвоевременно, а наиболее детализированный анализ качества водных ресурсов в региональном разрезе представляется Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с периодичностью один раз в два года. В этой связи возникает проблема оперативной оценки состояния качества водных ресурсов, однако кардинальным изменениям способствуют только внешние негативные техногенные факторы, а в последние годы в исследуемом макрорегионе не наблюдается положительных тенденций. Так, в 2024 году в Азовском гидрографическом районе степень загрязненности воды находилась в диапазоне от 1-го до 5-го класса качества (от «условно чистой» до «экстремально грязной») [3]. При этом следует отметить, что превалируют 3-й и 4-й классы качества (рис. 2).

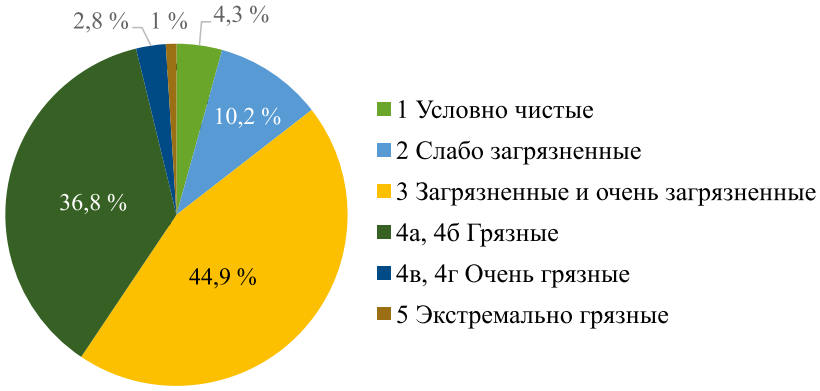


Рис. 2. Степень загрязнения водных объектов Азовского гидрографического района [3]
Fig. 2. The pollution degree of the Azov hydrographic area water bodies [3]

В бассейне реки Терек наблюдается преобладание «загрязненной» и «очень загрязненной» воды в большинстве створов при отсутствии 5-го класса качества («экстремально грязной») воды (рис. 3).

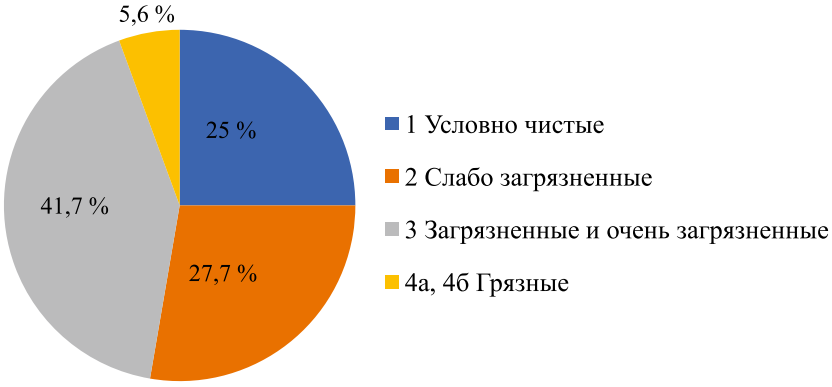


Рис. 3. Степень загрязнения водных объектов бассейна реки Терек [3]
Fig. 3. The pollution degree of the Terek River basin water bodies [3]

В водных объектах Дагестана качество воды варьировалось от 2-го класса («слабо загрязненная») до 3-го класса («загрязненная» и «очень загрязненная»), «очень загрязненная» вода характерна для бассейна реки Самур, а единственное оценивавшееся водохранилище в данном регионе, Чиркейское, имеет 2-й класс качества воды («слабо загрязненная») [3].

Оцененное состояние качества воды в регионах Юга России создает системные ограничения для промышленного водопользования. Антропогенная нагрузка на водные объекты усугубляется природно-климатическими факторами – маловодьем, паводками и геохимическими особенностями региона. Необходимо заметить, что в представленной оценке качества с помощью удель-

ного комбинаторного индекса вод[10] существует проблема отсутствия учета региональных особенностей исследуемых водных объектов – данное положение находит отражение во многих отечественных исследованиях.

Техногенная нагрузка на промышленность макрорегиона связана с наиболее распространенными загрязняющими химическими веществами, характерными для данной области (табл. 7).

Основными источниками загрязнений являются сточные воды предприятий, коммунально-бытовые стоки, животноводческие стоки и свалки в водоохранных зонах, а также на территории Дагестана мелиоративные системы и промышленные объекты, расположенные в водоохранных зонах.

Таблица 7. Наиболее распространенные загрязняющие водные объекты вещества на территории Юга России [3]

Table 7. The most widely spread water bodies' pollutants on the territory of the South of Russia [3]

Загрязняющее вещество	Азовский район	Бассейн Терека	Дагестан
Органика (БПК$_5$/ХПК)	Системный загрязнитель	27 случаев	Характерно для озера
Соединения азота (аммонийный, нитритный)	–	2–11 ПДК	–
Сульфаты	–	161–189 мг/л	до 877 мг/л (озеро)
Соединения меди	Системный загрязнитель	2 ПДК (Новый Терек)	1–2 ПДК
Соединения железа	–	1–2 ПДК	1–2 ПДК
Нефтепродукты	Частота превышений до 34,95 %	Единичные случаи	–

Системный анализ влияния данного уровня качества водных ресурсов на отрасли промышленности макрорегиона свидетельствует о возникновении следующих рисков для промышленной безопасности Юга России.

1. Технологические риски. Для таких водоемких отраслей, как теплоэнергетика, химическая промышленность, металлургия и целлюлозно-бумажное производство, использование воды 3-го («загрязненная» и «очень загрязненная») и 4-го классов качества («грязная» и «очень грязная») повлечет за собой удорожание водоподготовки, поскольку при концентрации органических веществ на высоком уровне потребуется внедрение многоступенчатых систем очистки для обеспечения нормативов качества сточных вод, сбрасываемых в водные объекты[11]. Этому будет сопутствовать повышенный износ оборудования по причине ускорения коррозионных процессов из-за высокой концентрации сульфатов, железа и наличия меди как системного загрязнителя, создающих агрессивную среду для теплообменных аппаратов и трубопроводов.

10 Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2002.

11 Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 (ред. от 28.11.2023) «Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».

2. Правовые риски. В Водном кодексе Российской Федерации устанавливается обязанность соблюдения нормативов допустимого воздействия на водные объекты[12]. За счет текущего неудовлетворительного качества воды повышается риск нарушения этих нормативов, что может повлечь за собой применение мер административной и гражданско-правовой ответственности, ограничение водопользования в маловодные периоды и необходимость компенсационных выплат за ущерб водным биологическим ресурсам.

Данные риски и сложившаяся обстановка в водном хозяйстве детерминируют в промышленном секторе внедрение систем оборотного водоснабжения с замкнутым циклом для снижения зависимости от качества поверхностных вод и разработку программ повышения эффективности очистных сооружений; для научного сообщества и регуляторов – расширение перечня определяемых веществ при мониторинге водных объектов, разработку целевых показателей качества воды с учетом региональных особенностей и их утверждение на законодательном уровне. Отсутствие подобных мер может привести к дестабилизации промышленной безопасности регионов Юга России и, как следствие, стать барьером для экономического развития региона.

ВЫВОДЫ

На основе указанных выше положений авторами предлагается концептуальная модель, опирающаяся на три предпосылки: реципрокная связь промышленной и экологической безопасности, двусторонность связи водных ресурсов и индустриального сектора, использование уточненных оценок водообеспеченности с учетом дополнительных потерь на испарение с водной поверхности и качества водных ресурсов с учетом региональных особенностей (рис. 4).

Входным контуром модели являются количественный (водообеспеченность) и качественный (класс качества воды) параметры. Воздействие данных факторов на промышленность осуществляется по двум каналам: через экстенсивные факторы производства путем сокращения объемов водных ресурсов как сырья и рост капиталовложений, не связанных с улучшением основных технологий, а направленных только на поддержание минимального уровня водоснабжения; через интенсивные факторы производства посредством снижения эффективности технологических процессов, проявляющегося в их замедлении, ухудшении свойств готовой продукции, торможении обновления основных фондов вследствие повышения физического износа оборудования и роста ресурсоемкости производства. Разделение данных каналов принципиально для модели: воздействие на интенсивные факторы означает, что во-

12 Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 04.08.2026). ВК РФ Статья 35. Разработка и установление нормативов допустимого воздействия на водные объекты и целевых показателей качества воды в водных объектах.

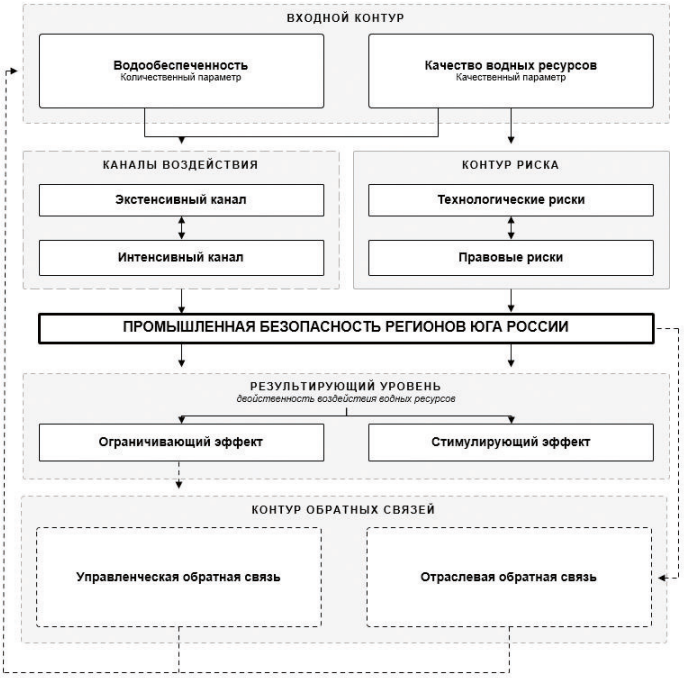


Рис. 4. Концептуальная модель взаимосвязи водообеспеченности, качества водных ресурсов и промышленной безопасности регионов Юга России

Fig. 4. Conceptual model of interconnection of water supply, water resources quality and industrial safety of regions of the South of Russia

дные ресурсы выступают не операционными издержками, а дестимуляторами интенсивного пути развития промышленного сектора. Качественным состоянием водных ресурсов регионов Юга России формируется рисковый контур, в котором выделяется два типа рисков: технологические риски, которые характерны для водоемких отраслей и проявляются в удорожании водоподготовки, необходимости многоступенчатых систем очистки и повышенном износе оборудования; правовые риски, связанные с появлением угрозы в применении мер административной и гражданско-правовой ответственности, ограничениях водопользования в маловодные периоды, компенсационных выплатах за ущерб водным биологическим ресурсам.

Совокупное действие экстенсивного и интенсивного каналов влияния определяет состояние промышленной безопасности регионов Юга России, т. е. технологическую надежность и бесперебойность функционирования промышленных объектов, и формирует результирующий уровень, на котором актуализируется двойственность водных ресурсов, проявляющаяся в ограничивающем эффекте при дефиците воды с низкой степенью загрязненности и в стимулирующем эффекте при внедрении водосберегающих технологий, модернизации инфраструктуры в промышленном и аграрном секторах и переходе к циркулярным моделям.

Модель замыкается двумя обратными связями, первая из которых – отраслевая, отражающая непосредственное воздействие промышленного комплекса на состояние водных ресурсов, вторая – управленческая, формирующаяся реакцией на достигнутый результат и включающая в себя для индустриального сектора внедрение систем оборотного водоснабжения с замкнутым циклом, программы повышения эффективности очистных сооружений, расширение перечня определяемых веществ при мониторинге водных объектов и разработку целевых показателей качества воды с учетом региональных особенностей с их законодательным утверждением. Логика данного контура соответствует последовательному расширению фокуса управления от рационального принятия решений к процессному, системному и ресурсно-комплементарному подходам и далее к цифровой трансформации управления на основе данных, моделей и знаний, обеспечивающих переход от локальной автоматизации к сквозной управляемости процессами.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьякова Е. А., Готфрид А. В. Водный рэнкинг регионов России за 2023 год: аналитический обзор / ФГБУН ИЭ УрО РАН; ООО «Кайрос Инжиниринг». Екатеринбург ; Пермь, 2025. С. 17.
2. Khatib A. W. The determinants of export performance in the digital transformation era // International Journal of Emerging Markets. 2024. Vol. 19. No. 10. P. 2597–2622.
3. Качество поверхностных вод Российской Федерации: ежегодник / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт» / гл. ред. М. М. Трофимчук. Ростов-на-Дону, 2025. С. 438–441.
4. Siyal A. W., Gerbens-Leenes P. W., Vaca-Jiménez S. D. Freshwater competition among agricultural, industrial, and municipal sectors in a water-scarce country. Lessons of Pakistan's fifty-year development of freshwater consumption for other water-scarce countries // Water Resources and Industry. 2023. Vol. 29. Art. 100206. P. 2–14. https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100206
5. Текслер А. Л. Цифровизация энергетики: от автоматизации процессов к цифровой трансформации отрасли / А. Л. Текслер // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 3–6. EDN: VNTATC
6. Косолапова Н.А., Матвеева Л.Г., Каплюк Е.В. Стратегические фронтиры индустриального ландшафта макрорегиона: кейс водных ресурсов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25
7. Дейниченко А. С. Влияние цифровых технологий на экспортный потенциал высокотехнологичной промышленности / А. С. Дейниченко // Друкеровский вестник. 2023. № 6 (53). С. 94–102.
8. Доржиева В. В. Цифровая трансформация промышленности и промышленная политика в условиях внешних ограничений // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13. № 2. С. 637–648. https://doi.org/10.18334/vinec.13.2.117692

9. Макаров И. А., Чернокульский А. В., Анискина Т. А., Виноградова В. В., Краев Г. Н., Куричев Н. К., Рацеева С. С., Смоловик Е. В., Чистиков М. Н., Шелудков А. В., Юдова О. А. Рейтинг регионов России по необходимости адаптации к изменению климата. Москва: НИУ ВШЭ, 2025. С. 8.
10. Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети: научно-прикладной справочник / под ред. В. С. Вуглинского. СПб.: ООО «РИАЛ», 2021. С. 61–62.
11. Глезман Л. В. Приоритеты пространственно-отраслевого развития регионов в условиях цифровизации экономики // Вопросы инновационной экономики. 2021. Т. 11. № 2. С. 581–596.
12. Водно-экологические проблемы и использование водных ресурсов / М. Н. Шевцов. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. С. 16.
13. Фомина В. Ф. Оценка водопользования регионов России по критериям водообеспеченности, эффективности и устойчивого развития // Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика». Т. 18. № 2. С. 219–222. https://doi.org/10.17072/1994- 9960-2023-2-215-240
14. Дунаева Е. А. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 173–181. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-173-181
15. Косолапова Н. А. Водно-ресурсный потенциал развития регионов в бассейнах рек Дон и Кубань / Н. А. Косолапова // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2016. № 7 (89). С. 18. EDN: WFHBGN
16. Атаев З. В. Динамика геоэкологического состояния ландшафтов бассейнов рек Восточного Кавказа в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки / Влияние экологических факторов на здоровье населения и проблемы продовольственной безопасности региона: Мат. Всероссийской научно-практ. конференции. Махачкала, Дагестанский государственный медицинский университет, 2025. С. 135–165.
17. Душенко Н. А., Головачева М. М., Капустин М. В., Суртаева К. С. Применение нейросетевого моделирования для идентификации водоемов в бассейнах рек по данным дистанционного зондирования Земли // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 74–94. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-74-94
18. Косолапова Н. А. и др. Модели циркулярной экономики в ресурсообеспечении индустриального развития регионов // Terra Economicus. 2022. Т. 20. № 3. С. 116–132.
19. Матвеева Л. Г., Саванович С. А. Высокотехнологичный сектор как цифровой трансформатор обрабатывающей промышленности // Друкеровский вестник. 2026. № 1 (53). С. 267–280.
20. Толстых Т. О., Моргунова М. К. Современные тенденции развития наукоемких предприятий в условиях системных вызовов // Экономика высокотехнологичных производств. 2024. Т. 5, № 2. С. 109–118. https://doi.org/10.18334/evp.5.2.121339
21. Якушев Н. О. Специфика взаимосвязи высокотехнологичного сектора и цифровизации для развития России // Вестник Московского университета им. С. Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. 2024. № 4 (51). С. 18–27. https://doi.org/10.21777/2587-554X-2024-4-18-27
22. Bacovis M. M. C., Borchardt M. Assessing the Influence of Circular Economy Practices in Companies that Orchestrate an Ecosystem of a Brazilian Industrial Cluster // Industrial Engineering and Operations Management. Conference paper. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78570-3_2
23. Hu G. et al. Uncovering the Mechanism of Elevating High-Tech Export Competitiveness // Sustainability. 2025. Vol. 17. No. 8. Art. 3667.
24. Zou Y., Liu J. The impact of digital technological innovation on high-tech industry exports in China // PLOS ONE. 2025. Vol. 20. No. 8. Art. e0330494.
25. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace. Paris: UNESCO, 2024. P. 50–59. https://doi.org/10.54679/WZDQ6209

REFERENCES

1. Tretyakova E.A., Gottfried A.V. Water ranking of Russian regions for 2023: analytical review / FGBUN IE Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Kairos Engineering LLC. Yekaterinburg ; Perm, 2025. P. 17.
2. Khatib A. W. The determinants of export performance in the digital transformation era. *International Journal of Emerging Markets*. 2024. Vol. 19. No. 10. P. 2597–2622.
3. Surface water quality of the Russian Federation: yearbook / Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Federal State Budgetary Institution "Hydrochemical Institute" / Ch. ed. M. M. Trofimchuk. Rostov-on-Don, 2025. P. 438–441
4. Siyal A. W., Gerbens-Leenes P. W., Vaca-Jiménez S. D. Freshwater competition among agricultural, industrial, and municipal sectors in a water-scarce country. Lessons of Pakistan's fifty-year development of freshwater consumption for other water-scarce countries. *Water Resources and Industry*. 2023. Vol. 29. Art. 100206. P. 2–14. https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100206
5. Texler A. L. Digitalization of energy: from process automation to digital transformation of the industry / A. L. Texler. *Energy policy*. 2018. No. 5. P. 3–6. EDN: VNTATC.
6. Kosolapova N. A., Matveeva L. G., Kaplyuk E. V. Strategic frontiers of the industrial landscape of the macroregion: case of water resources. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 6. P. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25
7. Deinichenko A. S. The influence of digital technologies on the export potential of the high-tech industry. *Drukerovsky Bulletin*. 2023. No. 6 (53). P. 94–102.
8. Dorzhieva V. V. Digital transformation of industry and industrial policy in conditions of external restrictions. *Issues of the innovative economy*. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 637–648. https://doi.org/10.18334/vinec.13.2.1176922
9. Makarov I. A., Chernokulsky A. V., Aniskina T. A., Vinogradova V. V., Kraev G. N., Kurichev N. K., Ratseeva S. S., Smolovik E. V., Chistikov M. N., Sheludkov A. V., Yudova O. A. Rating of Regions Russia on the need to adapt to climate change. Moscow: HSE, 2025. P. 8.
10. Long-term changes in evaporation in the European territory of Russia according to the data of the water evaporation network: scientific and applied reference book / edited by V. S. Vuglinsky. St. Petersburg: RIAL LLC, 2021. P. 61–62.
11. Glezman L. V. Priorities of spatial and sectoral development of regions in the context of digitalization of the economy. *Issues of the innovative economy*. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 581–596.
12. Water-ecological problems and use of water resources / M. N. Shevtsov. Khabarovsk: Publishing House Pacific. State university, 2015. P. 16.
13. Fomina V. F. Assessment of water use in the regions of Russia according to the criteria of water supply, efficiency and sustainable development. *Bulletin of Perm University*. Ser. "Economics." Vol. 18. No. 2. P. 219–222. https://doi.org/10.17072/1994- 9960-2023-2-215-240
14. Dunaeva E.A. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017. Vol. 14. No. 3. P. 173–181. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-173-181
15. Kosolapova N. A. Water resource potential of regional development in the Don and Kuban river basins / N. A. Kosolapova. *Management of economic systems: electronic scientific journal.* 2016. No. 7 (89). P. 18. EDN: WFHBGN.
16. Ataev Z. V. Dynamics of the geoecological state of the landscapes of the East Caucasus river basins in the context of climate change and anthropogenic stress/The impact of environmental factors on public health and food security problems in the region: Mat. All-Russian scientific practice. Conferences. Makhachkala, Dagestan State Medical University, 2025. P. 135–165.
17. Dushenko N. A., Golovacheva M. M., Kapustin M. V., Surtaeva K. S. Application of neural network modeling for the identification of water bodies in river basins according to remote sensing of the Earth.

Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2025. No. 3. P. 74–94. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-74-94

18. Kosolapova N. A. *et al*. Models of a circular economy in resource supply of industrial development of regions. *Terra Economicus*. 2022. Vol. 20. No. 3. P. 116–132.
19. Matveyeva L. G., Savanovich S. A. High-tech sector as a digital transformer of the manufacturing industry. *Drukerovsky Bulletin*. 2026. No. 1 (53). P. 267–280.
20. Tolstykh T. O., Morgunova M. K. Modern trends in the development of high-tech enterprises in the context of system challenges. *Economics of high-tech industries*. 2024. Vol. 5. No. 2. P. 109–118. https://doi.org/10.18334/evp.5.2.121339
21. Yakushev N. O. Specifics of the relationship between the high-tech sector and digitalization for the development of Russia. *Bulletin of S. Yu. Witte Moscow University. Series 1: Economics and Management.* 2024. No. 4 (51). P. 18–27. https://doi.org/10.21777/2587-554X-2024-4-18-27
22. Bacovis M. M. C., Borchardt M. Assessing the Influence of Circular Economy Practices in Companies that Orchestrate an Ecosystem of a Brazilian Industrial Cluster. *Industrial Engineering and Operations Management*. *Conference paper*. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78570-3_2
23. Hu G. et al. Uncovering the Mechanism of Elevating High-Tech Export Competitiveness. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 8. Art. 3667.
24. Zou Y., Liu J. The impact of digital technological innovation on high-tech industry exports in China. *PLOS ONE*. 2025. Vol. 20. No. 8. Art. e0330494.
25. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace. Paris: UNESCO, 2024. P. 50–59. https://doi.org/10.54679/WZDQ6209

Сведения об авторах:

Матвеева Людмила Григорьевна, д-р экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Максима Горького, 88; https://orcid.org/0000-0002-7156-5856; e-mail: lmatveeva@sfedu.ru

Косолапова Наталья Алексеевна, д-р экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Максима Горького, 88; https://orcid.org/0000-0001-9099-9062; e-mail: nakosolapova@sfedu.ru

Папушенко Максим Валерьевич, канд. экон. наук, АНО «Федеральный центр компетенций в сфере производительности труда», Департамент производительности труда и улучшения условий ведения бизнеса, Россия, 123022, Москва, ул. Сергея Макеева, 13; https://orcid.org/0000-0001-5768-6486; e-mail: maxrostovdon@mail.ru

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

About the authors:

Lyudmila G. Matveyeva, Doctor of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Maksima Gorkogo, 88, Rostov-on-Don, 344002, Russia: https://orcid.org/0000-0002-7156-5856; e-mail: lmatveeva@sfedu.ru

Natalya A. Kosolapova, Doctor of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Maksima Gorkogo, 88, Rostov-on-Don, 344002, Russia, https://orcid.org/0000-0001-9099-9062; e-mail: nakosolapova@sfedu.ru

Maxim V. Papushenko, Candidate of Economic Sciences, ANO "Federal Center of Competence in the Field of Labor Productivity," Department of labor productivity and improving business conditions, ul. Sergeya Makeyeva, Moscow, 123022, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5768-6486; e-mail: maxrostovdon@mail.ru

Maria M. Golovacheva, Head of the Department for the Application of Artificial Intelligence in Water Resource Management, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, 10a ul. Chentsova, Rostov-on-Don, 344019, Russia; https://orcid.org/0009-0007-0512-4116; e-mail: mariya_200218@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 28.08.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 02.09.2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.

УДК 543.3

https://doi.org/10.35567/19994508-2026-5-46-60

Оригинальная статья / Original paper

Результаты кластерного анализа гидрохимических показателей поверхностных источников водопользования населения на засушливых территориях с семиаридным климатом

Л. П. Эрдниев[1], А. Н. Микеров[1, 2], С. В. Касимцев[1], Н. В. Касимцева[1], Т. А. Мухитдинова[1]

leonid-erdniev@yandex.ru

[1] *Саратовский медицинский научный центр гигиены «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, г. Саратов, Россия*

[2] *Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского, г. Саратов, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Негативные последствия изменения климата в России в большей степени проявляются на засушливых территориях с семиаридным климатом. Специфической проблемой этих территорий является высокая сезонная вариабельность гидрохимических показателей поверхностных водоисточников хозяйственно-питьевого водопользования, которая обусловливает эпизодическое несоответствие питьевой воды требованиям гигиенической безопасности. Разработка методов анализа и прогноза изменения качества воды в таких водоемах относится к списку приоритетных задач, определенных климатической доктриной. **Методы.** Для анализа климатических изменений использованы базы метеорологических данных, состояния поверхностных водных объектов – результаты физико-химического анализа 426 проб воды, отобранных за период 2023–2025 гг. Проведена статистическая обработка данных 26 гидрохимических показателей. **Результаты.** В рамках проведенной работы получен массив сопряженных данных о годовых и сезонных изменениях гидрохимических показателей в девяти водоемах, расположенных в Саратовской, Астраханской областях и Республике Калмыкии. Представлены результаты применения подхода, позволяющего провести кластерный анализ с разработкой дендрограммы иерархической кластеризации гидрохимических показателей. Данные анализа рекомендуется использовать для оценки и прогноза динамики изменения гидрохимических портретов водоемов на засушливых территориях, а также для индикации случаев эпизодических химических загрязнений водоемов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поверхностные водоисточники, гидрохимические показатели, засушливость, кластерный анализ, линейная регрессия, водопользование

© Эрдниев Л. П., Микеров А. Н., Касимцев С. В., Касимцева Н. В., Мухитдинова Т. А., 2026

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Эрдниев Л. П., Микеров А. Н., Касимцев С. В., Касимцева Н. В., Мухитдинова Т. А. Результаты кластерного анализа гидрохимических показателей поверхностных источников водопользования населения на засушливых территориях с семиаридным климатом // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 46–60; https://doi.org/10.35567/19994508-2026-5-46-60; EDN: DSAUFM

Results of a cluster analysis of hydrochemical parameters of surface water sources used by population on arid territories with semiarid climate

Leonid P. Erdniev[1], Anatoly N. Mikerov[1,2], Stanislav V. Kasimtsev[1], Natalya V. Kasimtseva[1], Tatyana A. Mukhitdinova[1]

leonid-erdniev@yandex.ru

[1] *Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies», Saratov, Russia*

[2] *Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, Saratov, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The negative consequences of climate change in Russia are most pronounced in arid territories with a semiarid climate. A specific problem in these territories is the high seasonal variability of hydrochemical parameters of domestic and drinking water sources, which leads to occasional non-compliance of drinking water with hygienic safety requirements. The development of methods for analyzing and predicting changes in water quality in such reservoirs is one of the priority tasks defined by the climate doctrine. **Methods.** To analyze climate change, we used the meteorological data base, and data on the surface water body status: results of physical/chemical analysis of 426 water samples taken in 2023-2025. We have statistically processed data of 26 hydro/chemical indicators. **Results.** This study obtained a dataset of conjugated annual and seasonal changes in hydrochemical parameters in nine water bodies located in the Saratov and Astrakhan regions and the Republic of Kalmykia. The results of an approach that allows for cluster analysis and the development of a dendrogram of hierarchical clustering of hydrochemical parameters are presented. The results of the analysis are recommended for use in assessing and predicting the dynamics of changes in the hydrochemical profiles of water bodies in arid areas, as well as for identifying cases of episodic chemical pollution in these water bodies.

KEYWORDS: surface water sources, hydrochemical parameters, aridity, cluster analysis, linear regression

FOR CITATION: Erdniev L. P., Mikerov A. N., Kasimtsev S. V., Kasimtseva N. V., Mukhitdinova T. A. Results of a cluster analysis of hydrochemical parameters of surface water sources used by population on arid territories with semiarid climate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2026. No. 5. P. 46–60. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-5-46-60; EDN: DSAUFM

ВВЕДЕНИЕ

Изменение семиаридного климата на засушливых территориях России – одна из ведущих причин негативного воздействия на гидрохимические показатели вод поверхностных источников хозяйственно-питьевого водопользования населения. Специфической особенностью водоисточников на этих территориях является большая вариабельность значений гидрохимических показателей за счет сезонных изменений концентраций химических веществ [1–3]. В ряде случаев высокие концентрации химических веществ в водоисточнике выступают причиной несоответствия качества питьевой воды требованиям гигиенической безопасности и представляют риск здоровью населения. Поэтому расширение возможностей анализа влияния климатических факторов на гидрохимические показатели водных объектов и повышение достоверности долгосрочной оценки этих изменений становятся одними из важных оперативных мер, направленных на адаптацию к изменениям климата в соответствии с Климатической доктриной Российской Федерации[1].

Важным аспектом в исследовании гидрохимии водных объектов является статистическая обработка большого массива сопряженных данных, результаты которой, в частности, используются для оценки и прогнозирования гигиенической безопасности, реализации алгоритмов оценки заболеваемости, ассоциированной с воздействием водного фактора, и оценки эффективности программ по улучшению качества питьевой воды. Современные достижения в области развития методов статистического анализа данных, основанных на алгоритмах машинного обучения, позволяют в большей степени сделать этот процесс автономным, требующим от исследователя только выполнения операции по вводу значений гидрохимических показателей [4]. Такой подход, основанный на статистической обработке массива сопряженных значений гидрохимических показателей за несколько лет наблюдения, позволяет провести иерархическую кластеризацию показателей и построить дендрограмму для отдельно взятого водоема.

Анализ состояния вопроса показал, что данные о применении метода иерархической кластеризации гидрохимических показателей носят разрозненный характер и не имеют системного подхода к оценке влияния внешних факторов на водоемы. Наиболее часто встречаемый подход основан на использовании метода объединения водоемов в группы, схожие по дендрограммам кластеров гидрохимических показателей [5–7]. Однако на засушливых территориях России, где преобладает семиаридный климат, каждый водный объект является уникальным по своему гидрохимическому составу, и поэтому иерархическая кластеризация должна быть ориентирована на формирование индивидуальных «портретов водоемов» с учетом анализа многолетних наблюдений, учитываю-

1 Об утверждении климатической доктрины Российской Федерации: Указ Президента РФ от 26.10.2023 № 812 // Собрание законодательства РФ № 44 (ст. 7865) от 30.10.2023. С. 20859 – 20869.

щих сезонные изменения химических веществ в воде. Именно такой подход позволит дифференцировать признаки климатического или антропогенного воздействия на водоемы, расположенные на засушливых территориях.

Цель представленной в статье работы – провести кластерный анализ гидрохимических показателей отдельно взятых поверхностных источников хозяйственно-питьевого водопользования населения на засушливых территориях с семиаридным климатом и проанализировать его результаты.

Для достижения цели были сформулированы следующие задачи: оценить гидрохимических показатели водных объектов на засушливых территориях в зоне влияния семиаридного климата; обосновать критерии для проведения иерархического кластерного анализа гидрохимических показателей; провести анализ с последующим описанием векторов развития направлений практического применения результатов исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа климатических изменений использованы базы метеорологических данных Саратовской, Астраханской, Рязанской областей и Республики Калмыкия за период 2014–2025 гг., размещенные на сайтах meteoblue.com, pogodaiklimat.ru. Для формирования библиотеки данных гидрохимических показателей аккумулированы результаты физико-химического анализа 426 проб воды, отобранных за период 2023–2025 гг. из поверхностных водоисточников Саратовской обл. (рек Большой Узень, Малый Узень, Еруслан), Астраханской обл. (рек Ахтуба, Ашулук, Бузан, Васильевская) и Республики Калмыкии (озеро Маныч-Гудило на реке Маныч, Гашунский канал). Частота отбора проб составляла три раза в год (весна, лето, осень) из водоисточников, расположенных на территории Саратовской и Астраханской обл. и 1 раз в год (весной) на территории Республики Калмыкии.

В ходе анализа оценивались 26 гидрохимических показателей воды: Cl^-, SO_4^{-2}, F^-, NH_3, NO_3^-, NO_2^-, PO_4^{-3}, Ni, Cd, Pb, Mn, Mg, Si, As, Fe, Na, Ca, Cu, Cr, Sr, Ba, B, Zn, Li, K, общая минерализация. Отбор проб воды и интерпретацию о их гигиенической безопасности проводили в соответствии с регламентирующими документами Роспотребнадзора[2,3].

Статистическая обработка данных велась с использованием программы для ЭВМ, разработанной Саратовским медицинским научным центром гигиены, основанной на использовании метода Монте-Карло для выборок сред-

2 МР 2.1.4.0176–20 Организация мониторинга обеспечения населения качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения. Методические рекомендации / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М., 2020. 14 с.

3 Постановление главного государственного санитарного врача от 28 января 2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62296.

него объема и стандартных методов библиотеки SciPy для больших выборок (свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026664214 от 14.05.2026) [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В период с 2023 по 2025 г. специалистами Саратовского медицинского научного центра гигиены были оценены гидрохимические показатели поверхностных источников хозяйственно-питьевого водопользования населения, характеризующихся малой водностью и расположенных на засушливых территориях Саратовской, Астраханской обл. и Республики Калмыкии в зоне влияния семиаридного климата [9]. Результаты анализа баз данных отечественных и иностранных архивов информагентств[4],[5] показали, что в сравнении с центральной частью России негативное изменение климата на этих территориях за последнее десятилетие подтверждается сокращением количества выпадаемых годовых осадков, повышением среднегодовой температуры воздуха, увеличением числа засушливых дней в году. Результаты анализа средних скользящих за период 2014–2025 гг. представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ изменения климатических показателей на засушливых территориях и в средней полосе России за период 2014-2025 гг.

Table 1. Comparative analysis of changes in climate indicators on arid territories and in central Russia for the period 2014–2025

Климатический показатель	Республика Калмыкия	Саратовская обл.	Астраханская обл.	Средняя полоса России
Изменение числа дней в году с количеством осадков 10 мм и менее	+30	+60	+18	−30[1]
Изменение средней годовой температуры, °С	+0,9	+0,5	+0,3	+0,5
Изменение количества годовых осадков, мм	−30	−22	−11	+83[1]
Средняя годовая температура воздуха, °С	11,4	8,5	11,8	5,1
Годовое количество атмосферных осадков, мм	366	327	201	463[1]

Примечание: 1 – при сравнении за показатели средней полосы России представлены параметры Рязанской области.

По данным исследователей, именно эти специфические климатические изменения на засушливых территориях являются ведущей причиной сезонных изменений концентраций химических веществ природного происхождения в поверхностных водоисточниках с малой водностью [10–12]. На основании исследования 436 проб воды, отобранных из поверхностных источников, были проанализированы годовая и сезонная динамики изменений концентраций 26 гидрохимических показателей. Результаты показали, что концентрация

4 Meteoblue [Электр. ресурс]: URL: https://www.meteoblue.com/ru/погода/historyclimate/change (дата обращения: 27.07.2026).

5 Погода и климат [Электр. ресурс]: URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/34391.htm (дата обращения: 27.07.2026).

большинства химических веществ повышалась в воде в летне-осенний период и снижалась в зимне-весенний [1–3]. По обобщенным данным, на исследуемых территориях вариабельность концентраций отдельных веществ доходила до 20 раз в водоисточниках, используемых для хозяйственно-питьевого водопользования населением, и до 60 раз в водоемах, которые не используются для этих целей. Наибольшей вариабельностью характеризовались такие соединения, как хлориды, сульфаты, свинец, никель, марганец, мышьяк, кадмий, железо в водоисточниках, не используемых для хозяйственно-питьевого водопользования. Однако в ряде случаев высокие концентрации никеля, марганца, кадмия и железа в водоисточниках хозяйственно-питьевого водопользования являлись причиной несоответствия питьевой воды санитарно-гигиеническим требованиям, установленным СанПиН 1.2.3685-21. Данный факт создает риски здоровью населения, обусловленные воздействием химического фактора в результате хронического перорального поступления этих веществ с питьевой водой.

Таблица 2. Средние показатели вариабельности концентраций ряда химических веществ в воде поверхностных водоисточников на засушливых территориях с семиаридным климатом за период 2023–2025 гг.

Table 2. Average variability of concentrations of a number of chemical substances in surface water sources in arid areas with a semi-arid climate for the period 2023–2025

Гидрохимический показатель	Вариабельность концентрации гидрохимических показателей, C_{max}/C_{min}		Максимальная выявленная концентрация веществ в питьевой воде относительно нормативных значений, C_{max}/ПДК
	В источниках хозяйственно-питьевого водопользования	В источниках, не используемых для хозяйственно-питьевого водопользования	
Хлориды (Cl^{-})	4	6	0,9
Сульфаты (SO_4^{-2})	2	3	0,4
Свинец (Pb)	3	50	0,8
Никель (Ni)	6	20	2,6
Марганец (Mn)	8	60	6,2
Мышьяк (As)	9	7	0,8
Кадмий (Cd)	9	не выявлено	1,6
Железо (Fe)	20	6	3,3

Изучение сезонной динамики изменений концентраций химических веществ показало возможность применения метода кластерного анализа для обработки массива данных исследования проб воды из поверхностных источников. В качестве главного кластерного признака обоснована схожесть динамики сезонных изменений концентраций химических веществ в поверхностном водоисточнике. Критерием отбора гидрохимических показателей в кластер был выбран коэффициент ранговой корреляции Спирмена между концентрациями

веществ ($r \geq 0{,}7$ или $r \leq -0{,}7$)) с уровнем статистической значимости ($p < 0{,}05$), что обосновывает «высокую» и «весьма высокую» тесноту связи переменных по шкале Чеддока. С учетом обозначенных критериальных положений для обработки массива данных сотрудниками Саратовского МНЦ гигиены была разработана программа статистического анализа санитарно-химических показателей воды [5], основанная на использовании метода Монте-Карло для выборок среднего объема [13, 14] и стандартных методов библиотеки SciPy для больших выборок [15]. Программа позволила провести автоматическую обработку входных данных, фильтрацию некорректных значений, расчет коэффициентов ранговой корреляции Спирмена, определение статистически значимых взаимосвязей между показателями и визуализацию результатов в виде тепловых карт корреляции и дендрограмм иерархической кластеризации [16].

С использованием обоснованных признаков и критериев проведен кластерный анализ массива данных, полученных в результате химического анализа проб воды из рек Большой Узень (п. Александров Гай) и Ахтуба (г. Ахтубинск) – источников хозяйственно-питьевого водопользования населения [17–19] для более 100 тыс. человек, проживающих на засушливых территориях Саратовской и Астраханской обл.

Результаты статистического анализа позволили объединить ряд гидрохимических показателей в кластеры: в частности, для р. Большой Узень выявлено шесть кластеров, включающих 13 показателей. Для р. Ахтубы статистическая обработка данных позволила определить пять кластеров, включающих 10 показателей. Результаты анализа представлены в табл. 3.

За период наблюдения также установлены значимые статистические связи между парами показателей: в р. Большой Узень – железо (Fe) и марганец (Mn) ($r = 0{,}95$), свинец (Pb) и магний (Mg) ($r = 0{,}79$); в р. Ахтубе – никель (Ni) и свинец (Pb) ($r = -0{,}89$).

Результаты проведенного исследования показали, что на засушливых территориях России поверхностные водоемы остаются приоритетными источниками хозяйственно-питьевого водопользования населения. При этом изменение климата и связанное с ним прогрессирующее негативное влияние на водоисточники проявляются в виде высокой вариабельности гидрохимических показателей, которая является причиной возникновения эпизодических рисков для здоровья населения, обусловленных воздействием химического фактора. Для сохранения здоровья и раннего предупреждения возникновения рисков Роспотребнадзором[6] организован системный мониторинг за качеством воды

6 Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 3 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий». Зарег. в Минюсте России 29.01.2021 № 62297.

Таблица 3. Результаты кластерного анализа гидрохимических показателей воды в реках Большой Узень и Ахтуба (2023–2025 гг.)

Table 3. Results of cluster analysis of hydrochemical parameters of water in the Bolshoy Uzen and Akhtuba rivers (2023–2025)

Гидрохимический показатель	Кластеры и значения ранговой корреляции Спирмена для пар показателей, (*r*)					
	Хлориды	Сульфаты	Фториды	Кальций	Бор	Общая минерализация
р. Большой Узень (Саратовская обл.)						
Хлориды (Cl-)	1,00	0,95	0,70*	0,92	0,94	0,95
Сульфаты (SO_4^{-2})	0,95	1,00	0,57*	0,98	0,94	0,90
Фториды (F^-)	0,70*	0,57*	1,00	0,53*	0,54*	0,55*
Натрий (Na)	0,97	0,92	0,60*	0,87	0,83*	0,92
Магний (Mg)	0,98	0,93	0,70	0,88	0,83*	0,93
Кальций (Ca)	0,92	0,98	0,53*	1,00	0,89	0,87
Бор (B)	0,94	0,94	0,54*	0,89	1,00	0,94
Кремний (Si)	−0,49*	−0,49*	−0,89	−0,43*	−0,54*	−0,49*
Медь (Cu)	−0,71*	−0,71*	−0,33*	−0,60*	−0,89	−0,71*
Марганец (Mn)	−0,45*	−0,38*	−0,52*	−0,45*	0,65*	−0,25*
р. Ахтуба (Астраханская обл.)						
Хлориды (Cl-)	1,00	0,94*	0,89	0,77*	0,90*	0,94
Сульфаты (SO_4^{-2})	0,94	1,00	0,94	0,83*	0,90*	1,00
Фториды (F^-)	0,89	0,94	1,00	0,94	0,70*	0,94
Марганец (Mn)	0,98	0,94	0,89	0,77*	0,90*	0,94
Натрий (Na)	0,83*	0,77*	0,89	0,94	0,60*	0,77*
Магний (Mg)	0,77*	0,83*	0,94	1,00	0,60*	0,83*
Кальций (Ca)	0,77*	0,83*	0,94	1,00	0,60*	0,83*

Примечание: * – не соответствует критериям кластерного отбора ($p > 0,05$ или $r < 0,7$).

в источниках хозяйственно-питьевого водоснабжения, в ходе которого формируются большие библиотеки данных, описывающих многолетнюю динамику изменения санитарно-химических показателей воды по водоисточникам. В современных условиях развития технологий машинного обучения и модернизации статистических методов создаются условия для разработки подходов, направленных на систематизацию данных библиотек на основе программных продуктов. В частности, использование модели на основе алгоритма линейной регрессии позволяет сформировать кластеры санитарно-химических показа-

телей. В представленной работе практическая апробация линейной модели позволила провести анализ данных и получить результаты, имеющие большую практическую значимость в направлении изучения и прогнозирования влияния климатических факторов на гидрохимические показатели поверхностных водных объектов, а также выявления эпизодических фактов химического загрязнения в результате антропогенного воздействия.

Достоверность результатов экстраполяции изменения концентраций гидрохимических показателей под влиянием климатических факторов определяется высокой статистической связью, характеризующей сезонные изменения концентраций веществ внутри кластеров, и сохранением структуры дендрограммы иерархической кластеризации. В этом случае при изменении значений гидрохимических показателей не происходит разрушения кластеров и дендрограммы иерархической кластеризации [20, 21]. Дендрограммы гидрохимических показателей рек Ахтуба и Большой Узень представлены на рис.1 и рис. 2.

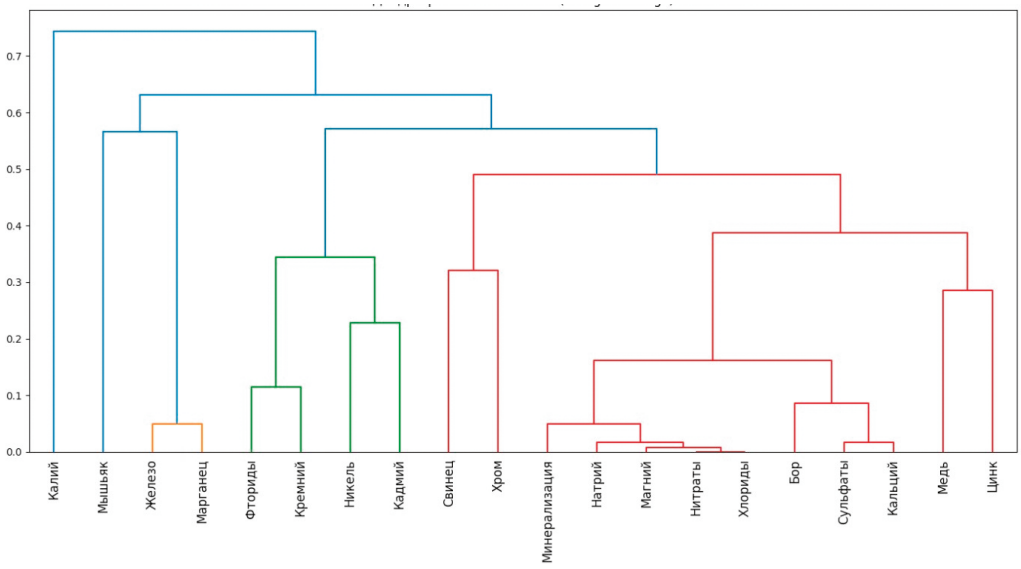


Рис. 1. Дендрограмма иерархической кластеризации гидрохимических показателей реки Ахтуба

Fig. 1. Dendrogram of hierarchical clustering of hydrochemical indicators of the Akhtuba River

В случае антропогенного воздействия предполагаемым маркерным признаком необходимо рассматривать ситуацию, когда происходит разрушение кластера по причине изменения статистических связей в результате значительного изменения значения какого-либо одного или нескольких гидрохимических показателей [22–24]. В этом случае разрушение кластера приводит к изменению дендрограммы иерархической кластеризации гидрохимических показателей. Поэтому наличие необоснованного изменения дендрограммы по

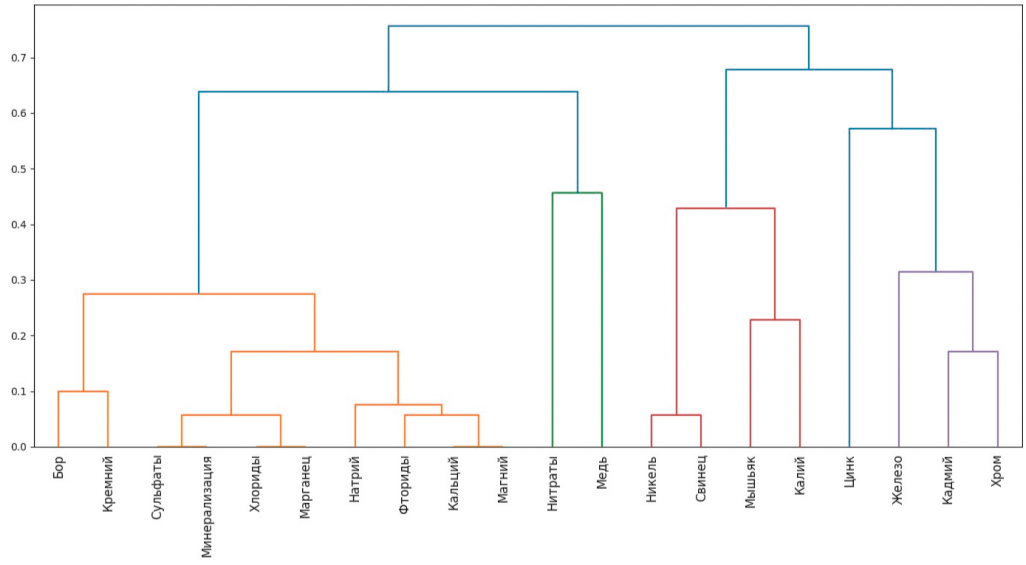


Рис. 2. Дендрограмма иерархической кластеризации гидрохимических показателей реки Большой Узень

Fig. 2. Dendrogram of hierarchical clustering of hydrochemical parameters of the Bolshoy Uzen River

причине разрушения кластера (кластеров) необходимо в первую очередь рассматривать как признак потенциального внешнего химического воздействие на водоисточник. Однако следует отметить факт относительности такого подхода к выявлению внешнего химического воздействия на водный объект ограниченным перечнем гидрохимических показателей, формирующих дендрограмму оцениваемого водоисточника или коротким периодом наблюдения, за который собрана база данных. Как показало исследование, в реках Большой Узень и Ахтуба наибольшую значимость при формировании кластеров показали хлориды, сульфаты, фториды, кальций, натрий, бор, магний, марганец. Выявленные статистические связи между динамикой изменения концентраций пар металлов также могут рассматриваться как индикаторы воздействия и косвенно свидетельствовать о химическом воздействии в случаях нарушения этих связей.

ВЫВОДЫ

В работе использованы результаты собственных исследований гидрохимических показателей поверхностных водоисточников, расположенных на засушливых территориях Саратовской и Астраханской областей и Республики Калмыкии в зоне влияния семиаридного климата. Обоснованные критерии для проведения иерархического кластерного анализа гидрохимических показателей в полной мере соответствуют критериям доказательности статистической связи между переменными при использовании непараметрического метода.

Результаты проведенного иерархического кластерного анализа показали, что методы статистического анализа с использованием алгоритмов машинного обучения позволяют провести обработку массива сопряженных данных с последующей иерархической кластеризацией гидрохимических показателей для отдельно взятых источников, расположенных на засушливых территориях.

В качестве вектора практического применения результатов иерархического кластерного анализа предложен подход, основанный на сохранности дендрограммы, который позволит дифференцировать признаки воздействия климатических и антропогенных факторов на поверхностные водоисточники, расположенные на засушливых территориях в зоне влияния семиаридного климата.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Описание применения генеративной модели: В работе использовался генеративный искусственный интеллект платформы Giga.chat для поиска информации о применяемых методах кластерного анализа и причин изменения иерархической кластеризации, размещенной в базе научных библиотек eLibrary, google.scholar, pubmed, cyberleninka, medline, elsevier. Использовалась большая языковая модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622638 Российская Федерация. База данных санитарно-химических показателей питьевой воды и воды источников питьевого водоснабжения, расположенных на территориях Новоузенского, Александрово-Гайского, Озинского, Ершовского, Федоровского районов Саратовской области за 2023 год / Л. П. Эрдниев, А. Н. Микеров, В. А. Чекмизов. Заявл. 22.05.2025, опубл. 19.06.2025.
2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623342 Российская Федерация. База данных санитарно-химических показателей питьевой воды и воды источников питьевого водоснабжения, расположенных на территориях Красноярского, Ахтубинского, Харабалинского и Володарского районов Астраханской области за 2024 год / Л. П. Эрдниев, А. Н. Микеров, В. А. Чекмизов. Заявл. 02.07.2025, опубл. 13.08.2025.
3. Мухитдинова Т. А., Касимцева Н. В., Эрдниев Л. П., Микеров А. Н. Анализ климатических факторов, оказывающих потенциальное негативное воздействие на санитарно-химические показатели воды систем центрального водоснабжения населения, расположенных на территориях с семиаридным климатом и с разной степенью засушливости // Перспективы экологического развития России и стран СНГ: мат-лы 7-й Межд. научно-практ. конференции. Екатеринбург, 6–8 апреля 2026. С. 57–62.
4. Нагметова А. Эволюция методов анализа данных: от традиционной статистики к машинному обучению // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 6 (87). С. 1249–1264.
5. Рогозин А. Г. Классификация водоемов Южного Урала по трофическому типу методами многомерного статистического анализа // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 711—724. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-73-711-724
6. Кондратьева Т. А., Исмаилова Р. Н., Волостнова О. И. Выявление закономерностей пространственного распределения загрязнения поверхностных вод республики Татарстан с использованием методов многомерной статистики. Сообщение 1. Кластерный анализ и метод главных компонент // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 18. С. 275–281.

7. Синькова И. С., Шестеркин В. П., Шестеркина Н. М. и др. Антропогенное влияние на химический состав вод малых рек Хабаровска в зимнюю межень // География и природные ресурсы. 2024. Т. 45. № 3. С. 91–97. https://doi.org/10.15372/GIPR20240309
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026664214, Российская Федерация. Программа статистического анализа санитарно-химических показателей воды водных объектов, используемых для водопользования населения на территориях с семиаридным климатом / М. А. Горенков, Л. П. Эрдниев, Р. Ш. Валиев, А. Н. Микеров. Заявл. 14.05.2026, опубл. 14.05.2026.
9. Титкова Т. Б. Современные климатические тенденции изменений испарения и влажности почвы на юге Европейской России // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29. № 3 (96). С. 4–14. https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-3-4-14
10. Сангаджиев М. М., Сангаджиева Р. С., Сангаджиева А. С. и др. Опасные природные явления: влияние динамики гидросферы на климат степных и пустынных зон Калмыкии // Московский экономический журнал. 2021. № 6. С. 248–255. https://doi.org/10.24412/2413-046X-2021-10345
11. Сангаджиев М. М., Манджиева Т. В., Эрдниев О. В. и др. Водные ресурсы Калмыкии: родники, колодцы, водохранилища, озера, реки и водно-болотные угодия. СПб: Изд. дом Scientia, 2025. 120 с.
12. Григоренко К. С., Матишов Г. Г. Минерализация малых водотоков Восточного Приазовья в современных маловодных условиях // Метеорология и гидрология. 2025. № 11. С. 124–131. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-11-124-131
13. Jabarullah Khan N. K., Elsheikh A. H. A machine learning based hybrid Multi-fidelity multi-level Monte Carlo method for uncertainty quantification // Frontiers in Environmental Sciences. 2019. Vol. 7. Art. 105. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00105
14. Jia Yongna & Yu Siwei & Ma Jianwei. Intelligent interpolation by Monte Carlo machine learning // Geophysics. 2018. Vol. 83. No. 2. https://doi.org/10.1190/geo2017-0294.1
15. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. No. 17. P. 61–272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
16. Кисляков А. Н., Поляков С. В. Иерархические методы кластеризации в задаче поиска аномальных наблюдений на основе групп с нарушенной симметрией // Управленческое консультирование. 2020. № 5 (137). С. 116–127. https://doi.org/10.22394/1726-1139-2020-5-116-127
17. Полиданов М. А., Масляков В. В., Гуменный А. В. и др. Анализ экологической безопасности водных объектов на территории Саратовской области // Вода: химия и экология. 2024. № 2. С. 71–76.
18. Болгов М. В., Демин А. П. Водохозяйственные и экологические проблемы Нижней Волги и пути их решения // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 2. С. 211–220. https://doi.org/10.7868/S0321059618020116
19. Сокольская Е. А., Золотарева Н. В., Локтионова Е. Г. Мониторинг состояния воды реки Ахтубы для оценки качества жизни населения Красноярского района Астраханской области // Естественные науки. 2023. № 3 (12). С. 28–37. https://doi.org/10.54398/1818507X_2023_3_28
20. Shenbagalakshmi G., Shenbagarajan A., Thavasi S. *et al*. Determination of Water Quality indicator using deep hierarchical cluster analysis // Urban Climate. 2023. Vol. 49. Art. 101468. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101468
21. Gao Y., Fang H., Ni K., Feng Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. 8036. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6
22. Мусаев Ш. Ж., Елисеев Ю. Ю., Луцевич И. Н. Механизмы поведения химических соединений в поверхностном, объемном слоях и донных отложениях водоемов при их антропогенном загрязнении // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1–8. С. 1914–1916.

23. Tiri A., Lahbari N., & Boudoukha A. Assessment of the quality of water by hierarchical cluster and variance analyses of the Koudiat Medouar Watershed, East Algeria // Applied water science. 2017. Vol. 7. P. 4197–4206. https://doi.org/10.1007/s13201-014-0261-z
24. Zahoránszky L. A., Katona G. Y., Hári P. *et al*. Breaking the hierarchy – a new cluster selection mechanism for hierarchical clustering methods // Algorithms in molecular biology. 2009. Vol. 4. Art. 12. https://doi.org/10.1186/1748-7188-4-12

REFERENCES

1. Erdniev L. P., Mikerov A. N., Chekmizov V.A. Certificate of state registration of database No. 2025622638 Russian Federation. Database of sanitary and chemical indicators of drinking water and water from drinking water supply sources located in the Novouzensky, Aleksandrovo-Gaisky, Ozinsky, Yershovsky, and Fyodorovsky districts of the Saratov region for 2023. Declared 22.05.2025, published 19.06.2025.
2. Erdniev L. P., Mikerov A. N., Chekmizov V. A. Certificate of state registration of database No. 2025623342 Russian Federation. Database of sanitary and chemical indicators of drinking water and water from drinking water supply sources located in the Krasnoyarsk, Akhtubinsky, Kharabalinsky and Volodarsky districts of the Astrakhan region for 2024 Declared 02.07.2025, published 13.08.2025.
3. Mukhitdinova T. A., Kasimtseva N. V., Erdniev L. P., Mikerov A. N. Analysis of climatic factors that have a potential negative impact on the sanitary and chemical parameters of water in central water supply systems for the population located in areas with a semi-arid climate and varying degrees of aridity. Prospects for the environmental development of Russia and the CIS countries: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference held within the framework of the XXIII Ural Mining and Industrial Decade, Yekaterinburg, April 6–8, 2026. P. 57–62.
4. Nagmetova A. Evolution of data analysis methods: from traditional statistics to machine learning. *Science Bulletin*. 2025. Vol. 4. No. 6 (87). P. 1249–1264.
5. Rogozin A. G. Classification of water bodies in the Southern Urals by trophic type using multivariate statistical analysis methods. *Hydrometeorology and Ecology*. 2023. No. 73. P. 711–724. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-73-711-724
6. Kondratyeva T. A., Ismailova R. N., Volostnova O. I. Identifying patterns in the spatial distribution of surface water pollution in the Republic of Tatarstan using multivariate statistical methods. Report 1. Cluster analysis and the principal component method. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2013. Vol. 16. No. 18. P. 275–281.
7. Sinkova I. S., Shesterkin V. P., Shesterkina N. M. *et al.* Anthropogenic impact on the chemical composition of water in small rivers of Khabarovsk during the winter low-flow period. *Geography and Natural Resources*. 2024. Vol. 45. No. 3. P. 91–97. https://doi.org/10.15372/GIPR20240309
8. Gorenkov M. A., Erdniev L. P., Valiev R. Sh., Mikerov A. N. Certificate of state registration of the computer program No. 2026664214 Russian Federation. Program for statistical analysis of sanitary and chemical indicators of water in water bodies used for water use by the population on territories with a semi-arid climate. Declared 14.05.2026. Published 14.05.2026.
9. Titkova T. B. Modern climatic trends in changes in evaporation and soil moisture in the south of European Russia. *Arid ecosystems*. 2023. Vol. 29. No. 3 (96). P. 4–14. https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-3-4-14
10. Sangadzhiev M. M., Sangadzhieva R. S., Sangadzhieva A. S. *et al*. Hazardous natural phenomena: the influence of hydrosphere dynamics on the climate of the steppe and desert zones of Kalmykia. *Moscow Economic Journal*. 2021. No. 6. P. 248–255. https://doi.org/10.24412/2413-046X-2021-10345

11. Sangadzhiev M. M., Mandzhieva T. V., Erdniev O. V. *et al*. Water resources of Kalmykia: springs, wells, reservoirs, lakes, rivers and wetlands. St. Petersburg: Publishing House “Scientia”. 2025. 120 p.
12. Grigorenko K. S., Matishov G. G. Mineralization of small watercourses of the Eastern Azov region in modern low-water conditions. *Meteorology and Hydrology*. 2025. No. 11. P. 124–131. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-11-124-131
13. Jabarullah Khan N. K., Elsheikh A. H. A machine learning based hybrid Multi-fidelity multi-level Monte Carlo method for uncertainty quantification. *Frontiers in Environmental Sciences.* 2019. Vol. 7. Art. 105. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00105
14. Jia Yongna & Yu Siwei & Ma Jianwei. Intelligent interpolation by Monte Carlo machine learning. *Geophysics*. 2017. Vol. 83. No. 2. https://doi.org/10.1190/geo2017-0294.1
15. Virtanen P., Gommer R., Oliphant T. E. *et al*. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods.* 2020. No. 17. P. 61–272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
16. Kislyakov A. N., Polyakov S. V. Hierarchical clustering methods in the problem of searching for anomalous observations based on groups with broken symmetry. *Management Consulting*. 2020. No. 5 (137). P. 116–127. https://doi.org/10.22394/1726-1139-2020-5-116-127
17. Polidanov M. A., Maslyakov V. V., Gumenny A. V. *et al*. Analysis of environmental safety of water bodies in the Saratov region. *Water: chemistry and ecology*. 2024. No. 2. P. 71–76.
18. Bolgov M. V., Demin A. P. Water management and environmental problems of the Lower Volga and ways to solve them. *Water resources*. 2018. Vol. 45. No. 2. P. 211–220. https://doi.org/10.7868/S0321059618020116
19. Sokolskaya E. A., Zolotareva N. V., Loktionova E. G. Monitoring the water condition of the Akhtuba River to assess the quality of life of the population of the Krasnoyarsk district of the Astrakhan region. *Natural sciences*. 2023. No. 3 (12). P. 28–37. https://doi.org/ 10.54398/1818507X_2023_3_28
20. G. Shenbagalakshmi, & A. Shenbagarajan, & S. Thavasi *et al*. Determination of Water Quality indicator using deep hierarchical cluster analysi. *Urban Climate*. 2023. Vol. 49. Art. 101468. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101468
21. Gao Y., Fang H., Ni K., Feng Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Scientific Reports.* 2022. Vol. 12. Art. 8036. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6
22. Musaev Sh. Zh., Eliseev Yu. Yu., Lutsevich I. N. Mechanisms of behavior of chemical compounds in the surface, volumetric layers and bottom sediments of water bodies during their anthropogenic pollution. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011. Vol. 13. No. 1–8. P. 1914–1916.
23. Tir A., Lahbari N., Boudoukha A. Assessment of the quality of water by hierarchical cluster and variance analyses of the Koudiat Medouar Watershed, East Algeria. *Applied water science*. 2017. Vol. 7. P. 4197–4206. https://doi.org/10.1007/s13201-014-0261-z
24. Zahoránszky L. A., Katona G. Y., Hári P. et al. Breaking the hierarchy – a new cluster selection mechanism for hierarchical clustering methods. *Algorithms in molecular biology*. 2009. Vol. 4. Art. 12. https://doi.org/10.1186/1748-7188-4-12

Сведения об авторах:

Эрдниев Леонид Петрович (корреспондирующий автор), канд. мед. наук, профессор Академии военных наук РФ, ведущий научный сотрудник лаборатории гигиенических методов исследования факторов окружающей среды, Саратовский медицинский научный центр гигиены ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, зд. 1; https://orcid.org/0000-0001-5187-7361; e-mail: leonid-erdniev@yandex.ru

Микеров Анатолий Николаевич, д-р биол. наук, руководитель Саратовского МНЦ гигиены, профессор кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии, Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского, 410012, Россия, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112; https://orcid.org/0000-0002-0670-7918; e-mail: mail@smncg.ru

Касимцев Станислав Викторович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории гигиенических методов исследования факторов окружающей среды, Саратовский медицинский научный центр гигиены ФГБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, зд. 1; https://orcid.org/0009-0003-5461-6396; e-mail: staskas73@mail.ru

Касимцева Наталья Викторовна, младший научный сотрудник лаборатории физико-химического анализа, Саратовский медицинский научный центр гигиены ФГБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, зд. 1; https://orcid.org/0009-0002-6231-4112; e-mail: kas-nat75@mail.ru

Мухитдинова Татьяна Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории физико-химического анализа, Саратовский медицинский научный центр гигиены ФГБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, зд. 1; https://orcid.org/0009-0005-2222-5221; e-mail: mail@smncg.ru

About the authors:

Leonid P. Erdniev (corresponding author), Candidate of Medical Sciences, Professor of Academy of Military Sciences of the Russian Federation, Leading Researcher, Laboratory of Hygienic Methods of Environment Factors Impact Research, Saratov Medical Research Center of Hygiene, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, ul. Zarechnaya, 1A, Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5187-7361; e-mail: leonid-erdniev@yandex.ru

Anatoly N. Mikerov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head, Saratov Medical Research Center of Hygiene, Razumovsky Saratov State Medical University Chair of Microbiology, Virology and Immunology, ul. Bolshaya Kazachya, 112, Saratov 410012, Russia; Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, 1A, Zarechnaya St., Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0670-7918; email: mail@smncg.ru

Stanislav V. Kasimtsev, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Hygienic Methods for Studying Environmental Factors, Saratov Medical Research Center of Hygiene, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, 1A, Zarechnaya St., Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0009-0003-5461-6396; email: staskas73@mail.ru

Natalya V. Kasimtseva, Junior Researcher, Laboratory of Physicochemical Analysis.

Saratov Medical Research Center of Hygiene, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, 1A, Zarechnaya St., Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0009-0002-6231-4112; email: kas-nat75@mail.ru

Tatyana A. Mukhitdinova, Junior Researcher, Laboratory of Physicochemical Analysis, Saratov Medical Research Center of Hygiene, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, 1A, Zarechnaya St., Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0009-0005-2222-5221; e-mail: mail@smncg.ru

Поступила в редакцию / Received 30.07.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 14.08 2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.

УДК 556.557

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-61-76

Обзорная статья / Review paper

Гидроэкологические аспекты осадкообразования в водоемах Европейской территории России

В. В. Законнов

zak@ibiw.ru

Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской Академии наук, пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Статья содержит краткий обзор исследований пространственно-временной трансформации грунтового комплекса водохранилищ Волги, опубликованных в журнале «Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление» с 2015 по 2022 г. и дающих исчерпывающий ответ на гидроэкологические аспекты и особенности осадкообразования в водохранилищах Волжского каскада и озерах, подвергшихся техногенному воздействию на Европейской территории России. **Методы.** Работа выполнена по стандартным географическим методам изучения экосистем внутренних водоемов. **Результаты.** На основании исследований: разработана схема происхождения и формирования грунтового комплекса равнинных водохранилищ; упрощена классификация подводных грунтов на генетическом уровне; рассчитаны нанософормирующие гидродинамические характеристики; составлены карты нижнего яруса экосистем водохранилищ; оценены количественно интенсивность осадконакопления, объем и вес донных осадков; выявлена широтная географическая зональность темпов осадконакопления в водохранилищах Волги и озерах Северо-Запада России; определены седиментационные балансы взвешенных наносов и их динамика; оценена роль илонакопления как главного гидроэкологического седиментационного депонирующего фактора самоочищения воды при физико-химическом и биологическом взаимодействии; выявлены изменения проектных характеристик и составлены ситуационные (по данным мониторинга) прогнозы путей формирования грунтового комплекса к 100-летию водохранилищ Волги. Полученные результаты могут быть использованы гидроэкологами для определения условий осадкообразования, продуктивности и антропогенного загрязнения нижнего яруса экосистем водоемов равнинных территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроэкология, донные отложения. осадкообразование, илонакопление, водохранилища, озера Европейской территории России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства высшего образования и науки РФ (гос. тема № 124032100076-2).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Законнов В. В. Гидроэкологические аспекты осадкообразования в водоемах Европейской территории России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 61–76; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-61-76; EDN: GFAQHR

© Законнов В. В., 2026

Hydroecological aspects of sediment formation in water bodies of the European territory of Russia

Viktor V. Zakonnov

zak@ibiw.ru

Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, Russia, 152742, Yaroslav Oblast, Nekouzskiy r-n, pos. Borok

ABSTRACT

Relevance. The article provides a brief overview of the studies "Spatial and temporal transformation of the sediment complex in the Volga reservoirs" published in the journal "Water Sector of Russia: problems, technologies, management" (from 2015 to 2022), which gives an exhaustive answer to the hydroecological aspects and features of sediment formation in reservoirs of the Volga cascade and lakes subjected to the anthropogenic impact on the European territory. **Methods.** The study was conducted according to standard geographic methods for investigating ecosystems of inland water bodies. **Results.** On the basis of these studies: a scheme for the origin and formation of the sediment complex of lowland reservoirs was developed; the classification of underwater ground at genetic level was simplified; sediment-forming hydrodynamic characteristics were calculated; maps of the lower tier of reservoir ecosystems were compiled; the rate of sediment accumulation, and the volume and weight of bottom sediments were quantified; a latitudinal geographic zonation of sedimentation rates in the Volga reservoirs and lakes of Northwest Russia was revealed; sedimentation balances of suspended sediments and their dynamics were determined; the role of silt accumulation as the main hydroecological sediment-depositing factor in water self-purification under physical and chemical and biological interactions was assessed; changes in the design parameters were identified, and situational (according to the monitoring data) forecasts were prepared for the pathways of formation of the sediment complex toward the 100th anniversary of the Volga reservoirs. The results obtained can be used by hydroecologists to determine the conditions of sediment formation, productivity and anthropogenic pollution of the lower tier of ecosystems of reservoirs in lowland territories.

KEYWORDS: hydroecology, bottom sediments, sediment formation, silt accumulation, reservoirs, lakes of the European part of Russia.

FUNDING: The study was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation (theme No. 124032100076-2).

FOR CITATION: Zakonnov V. V. Hydroecological aspects of sediment formation in water bodies of the European territory of Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 5. P. 61–76; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-61-76; EDN: GFAQHR

ВВЕДЕНИЕ

Составной частью геоэкологии – науки об изменении окружающей среды – является гидроэкология, позволяющая на практике минимизировать экологические и экономические ущербы с помощью природных гидрологических процессов и методов управления ими [1]. В термине «гидроэкология»[1], трактуемом как раздел экологии, изучающий водные экосистемы, их структуру и закономерности функционирования, включая взаимодействие между водной средой и обитающими в ней организмами, роль донных осадков не рассматривается. Наиболее корректно определение гидроэкологии приводится в учебном пособии В. Д. Романенко[2]: «Гидроэкология – это биологическая наука, изучающая водные экосистемы и их части как целостную систему взаимодействующих живых (биотических) и неживых (абиотических) компонентов».

Литология, которую на Западе называют седиментологией[3] всегда решала эти проблемы с гидроэкологических позиций. Некоторые исследователи считают, что вопросы, касающиеся условий осадкообразования, выходят за пределы литологии [2]. Однако несомненно, что изучение этих процессов как в настоящем, так и в прошлом необходимо для решения вопросов, связанных с генезисом осадочных пород.

В XXI в. природная среда уже с трудом справляется с антропогенными нагрузками, которые оборачиваются для нее непредсказуемыми последствиями. Изучить эти новые явления в природе и использовать полученные знания по рациональному природопользованию призвана гидроэкология. Поэтому гидроэкологические аспекты осадкообразования в настоящее время приобретают особое значение и актуальность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В обзоре обобщены материалы исследований осадкообразования в водохранилищах Волжского каскада с 1955 по 2025 г., а также в отдельных озерах Европейской территории России за последние 20 лет стандартными географическими методами изучения экосистем внутренних водоемов [3, 4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской академии наук по праву считается пионером в исследовании нижнего яруса пресноводных экосистем с гидроэкологических и гидробиологических позиций. Здесь впервые разработана и усовершенствована схема происхождения и формирования донных отложений равнинных водохранилищ (рис. 1) [5].

1 Экологический энциклопедический словарь. М.: Изд. Дом «Ноосфера», 1999. 930 с.
2 Романенко В. Д. Основы экологии. Учебник для студентов высших учебных заведений. К.: Генеза, 2004. 664 с.
3 Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.

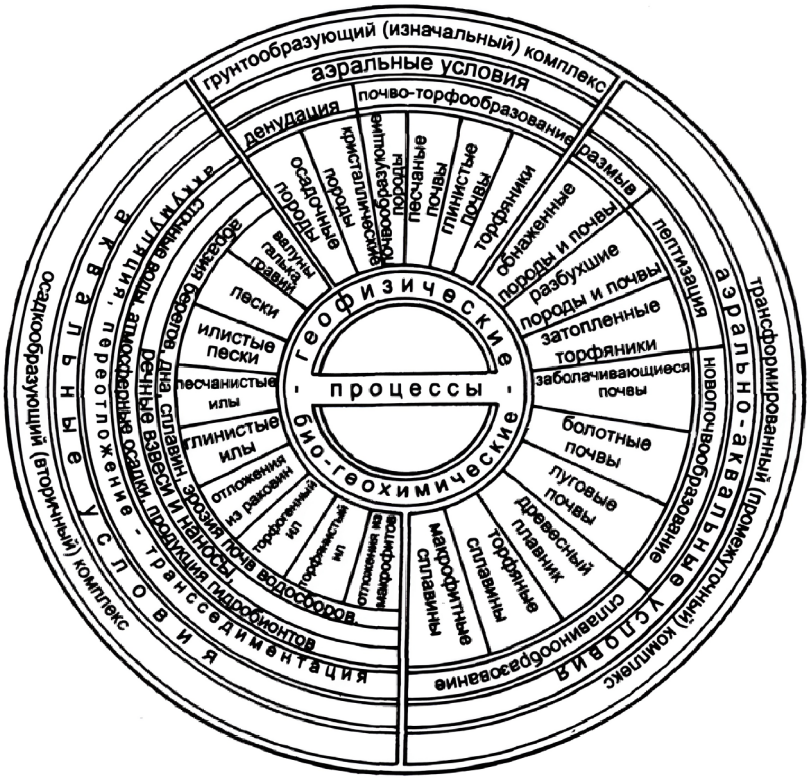


Рис. 1. Схема происхождения и формирования грунтового комплекса равнинных водохранилищ

Fig. 1. Scheme of origin and formation of the groundwater complex of lowland reservoirs

Донный ярус включает широкое разнообразие грунтового комплекса: «первичные» – реликтовые или остаточные породы Палеоволги (скалы, валуны, галечники, пески, глины, торф); «трансформированные» заболачивающиеся и болотно-луговые; и, наконец, почвы – размытые и разбухшие, в том числе «вторичные» – собственно донные осадки – гетеродисперсные минерально-органические крупнозернистые наносы (пески) и тонкодисперсные отложения (илы).

На основе разработанной схемы упрощена классификация грунтов и донных отложений с учетом генетического принципа (табл. 1). Гранулометрический состав и содержание органического вещества являются определяющими для выделения различных типов наносов, что признано многими исследователями [6, 7].

Нанософормирующие характеристики, условно оцениваемые скоростью придонного течения (м/с), рассчитаны по среднему диаметру частиц отдельного образца для всех зон Евроазиатского континента согласно формуле [8, 9]:

Таблица 1. Классификация грунтов и донных осадков водохранилищ Волги
Table. 1. Classification of ground and bottom sediments in the Volga reservoirs

Грунты			Основные физико-химические характеристики		
Группа	Подгруппа	Тип	Сумма фракций, %		Органическое вещество, %
			> 0,1 мм	< 0,01 мм	
Реликтовые (остаточные)	Минеральные	Скалы	–	–	< 1
		Валуны	–	–	< 1
		Галька	–	–	< 1
		Гравий	–	–	< 1
		Пески	> 90	< 10	< 1
		Глины	< 10	> 90	< 1
	Органические	Торф	–	–	> 70
Трансформированные	Минеральные	Обнаженные (размытые) почвы и породы	> 30	< 30	< 3
		Разбухшие почвы и породы	< 30	> 30	> 10
		Заболачивающиеся почвы	< 30	> 30	< 30
	Органические	Болотные почвы	< 30	> 30	> 30
Вторичные	Минеральные	Пески	100	–	< 1
		Илистые пески	> 70	< 30	1–5
		Песчанистые илы	< 70	> 30	5–10
		Глинистые илы	< 30	> 70	10–30
		Отложения из раковин		–	< 1
	Органические	Торфогенный ил	< 30	> 30	30–40
		Торфянистый ил	–	> 30	40–70
		Отложения из макрофитов	–	–	> 30

$$V_{м/с} = 2{,}16d^{1{,}07}(R^2 = 0{,}92,\ n = 222),$$

где V – придонная скорость течения (м/с);

d – средний диаметр частиц пробы (мм).

Придонная скорость течения включает в себя большое разнообразие гидродинамических процессов – стоковых и ветровых течений, воздействие волн на ложе и берега, способствующих седиментации и трансседиментации (переотложению) наносов и формированию типов осадков.

С учетом современных требований составлены карты грунтового комплекса водохранилищ Волги, где наглядно показана количественная и качественная трансформация различных типов донных осадков во времени и пространстве (список литературных источников приводится в [10]).

За многолетний период эксплуатации (от 45 лет Чебоксарского до 90 лет Иваньковского) водохранилищ Волги грунтовый комплекс достиг относительной стабильности, что очень важно для нормального функционирования пресноводных экосистем (рис. 2) [11].

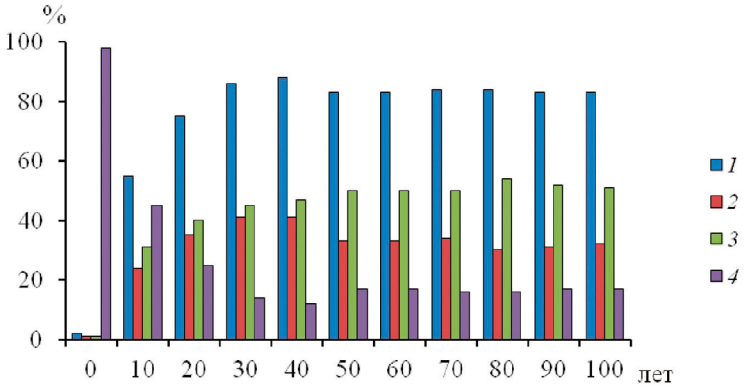


Рис. 2. Распределение площадей грунтового комплекса водохранилищ Волги и их прогноз к 100-летию эксплуатации: *1* – вторичные осадки, *2* – крупнозернистые наносы, *3* – тонкодисперсные отложения, *4* – трансформированные грунты

Fig. 2. Distribution of the areas ground complex of the Volga reservoirs and their forecast for the 100th anniversary of operation: *1* – secondary sediments, *2* – coarse-grained sediments, *3* – fine-grained sediments, *4* – transformed soils

Материалы зондирования толщи осадков (in situ) использовались для определения темпов седиментации. Расчеты показали, что максимум отложений (по абсолютной величине) отмечается в литорали (45–60 %), т. к. основное поступление осадкообразующего материала происходит за счет эрозионно-абразионных процессов (от 47 % в Чебоксарском до 86 % в Рыбинском).

Количественная оценка интенсивности осадконакопления, объем и вес вторичных осадков, а также прогноз к 100-летию водохранилищ представлены в табл. 3 [12].

Таблица 3. Динамика седиментационных характеристик и прогноз к 100-летию водохранилищ

Table. 3. Dynamics of sedimentation characteristics and forecast for the 100th anniversary of reservoirs

Водохранилище	Интенсивность осадконакопления, год$^{-1}$			Прогноз к 100-летию водохранилищ	
	A, мм	***B***, мм	***S***, млн м^3	***C***, мм/год	***V***, %
Иваньковское	3,0	1,9	0,5	1,6	2,3
Угличское	3,8	2,1	0,4	1,8	1,6
Рыбинское	9,2	2,7	10,3	2,0	2,1
Горьковское	9,6	2,3	3,5	2,2	2,0
Чебоксарское	3,0	1,8	1,8	3,0	1,8
Куйбышевское	8,0	4,4	223,0	3,8	9,6
Саратовское	5,0	3,8	52,0	2,8	9,7
Волгоградское	10,0	4,9	141,4	4,0	11,3
R^2	0,18	0,68	0,43	0,81	0,73

Примечание. *A*, мм – среднегодовое осадконакопление на площадь «вторичных» наносов по результатам первой грунтовой съемки; *B*, мм, *S*, млн м^3 – последней; *C*, мм/год – занесение на площадь водохранилища при НПУ; *V*, % – потеря объемов воды.

В период заполнения водохранилищ коэффициенты детерминации незначимы (R^2 = 0,18), а в последующие съемки происходит постепенное приспособление (R^2 = 0,43–0,81) нижнего яруса экосистем к новым условиям и географической зональности осадконакопления в каскаде (табл. 3).

Потери объемов воды за счет накопления донных отложений примерно одинаковые, что доказано независимыми исследованиями на Угличском, Горьковском и Волгоградском водохранилищах [12, 13].

Формирование ложа и берегов сопровождается изменениями основных проектных гидроморфометрических характеристик водохранилищ, прежде всего отражающихся на величинах площадей акватории и их объемах, что необходимо знать и использовать при современной эксплуатации искусственных водоемов (табл. 4).

Таблица 4. Основные проектные гидроморфометрические характеристики водохранилищ Волги и их трансформация

Table. 4. The main design hydro-morphometric characteristics of the Volga reservoirs and their transformation

Водохранилище	Год заполнения	Площадь, км^2	Объем, км^3	Период эксплуатации, лет	Площадь, км^2	Объем, км^3
Иваньковское	1937	327	1,12	85	287	1,10
Угличское	1940	249	1,24	82	226	1,22
Рыбинское	1941	4550	25,42	81	4480	25,00
Горьковское	1955	1591	8,70	67	1509	8,59
Чебоксарское*	1981*	2270	13,85	41*	1200	5,20
Куйбышевское**	1955	6450	58,00	61	5885	56,40
Саратовское	1967	1950	13,40	50	1833	11,97
Волгоградское	1958	3126	31,40	64	3248	28,08

Примечание. Чебоксарское* – уровень 68 м БС, уровень 63,5 м БС; Куйбышевское** – до и после создания Нижнекамской (1978 г.) и Нижнечебоксарской (1981 г.) ГЭС.

Интенсивность осадконакопления подчинена широтной географической зональности, которая увеличивается от зоны южной тайги до полупустынь в пределах Волжского водосборного бассейна и сопредельных территорий (рис. 3, рис. 4), подвергшихся техногенному воздействию в результате хозяйственной деятельности [14, 15].

Прежде всего эта зональность проявляется в изменении интенсивности осадконакопления – суммарного процесса осаждения крупнозернистых наносов и тонкодисперсных отложений – и менее четко по другим видам осадкообразования – занесению и заилению, которые в большей степени зависят от азональных факторов, связанных с особенностями режима эксплуатации ГЭС, гидроморфометрических показателей и антропогенного воздействия.

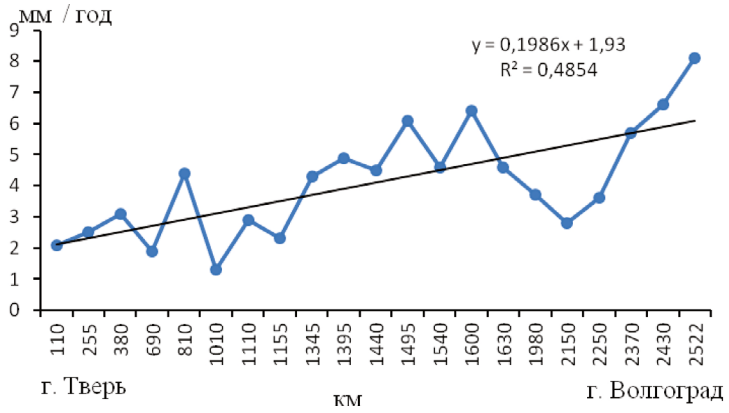


Рис. 3. Интенсивность осадконакопления в каскаде Волжских водохранилищ по участкам
Fig. 3. Sedimentation intensity in the cascade of the Volga reservoirs by section

Более четко географическая зональность осадконакопления проявляется в обследованных внутренних водах: в древних озерах Северо-Запада России – шесть (0,2–1,5 мм/год) и в современных озеровидных расширениях водохранилищ – 21 (1,5–7,0 мм/год), по одному расширению в Рыбинском, Иваньковском, Угличском, Саратовском, по три в Горьковском, Чебоксарском, Волгоградском и восемь в Куйбышевском, которые в пределах Палеоволги уже были озерами, а при строительстве плотин сохранили свои озерные очертания (табл. 5, рис. 4) [15].

Таблица 5. Основные гидроморфометрические характеристики отдельных озер Европейской территории России
Table. 5. The main hydromorphometric characteristics of individual lakes in the European part of Russia

Озера	*F*, км²	*V*, км³	Кв, год $^{-1}$	*Q*, мм / год
Лача	345	0,5	7,4	0,4
Воже	418	0,6	3,5	0,2
Белое	1284	5,3	0,9	0,5
Кубенское	417	1,0	3,6	1,3
Неро	58	0,9	2,2	1,5
Плещеево	52	5,8	3,0	1,0

Примечание: F, км² – площадь акватории; *V*, км³ – объем; Кв, год$^{-1}$ – коэффициент водообмена; *Q*, мм / год – скорость осадконакопления.

Рассматриваемая сеть лимнических систем находится между 36-м и 50-м меридианами на расстоянии с севера на юг примерно 1500 км от г. Каргополя до г. Волжский, значительная часть которых принадлежит бассейнам рек Онеги, Сухоны и Волги, включая гумидную и аридную зоны. Обследованные объекты отличаются резким нарушением равновесия в природе, где, наряду с естественными циклами водности, добавился режим эксплуатации озер

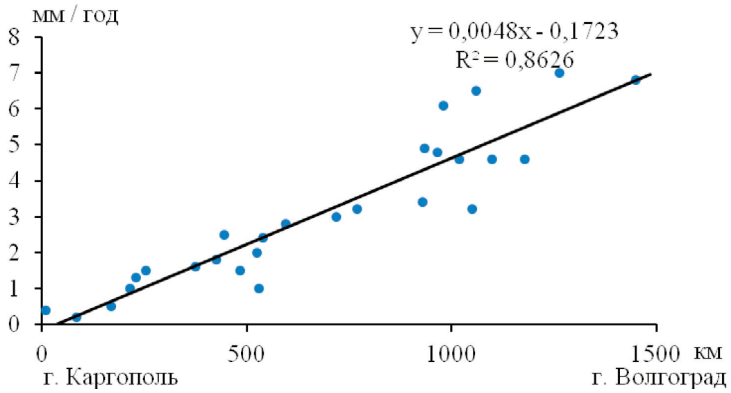


Рис. 4. Географическая зональность осадконакопления в озерах и озеровидных расширениях водохранилищ Волги

Fig. 4. Geographical zoning of sedimentation in lakes and lake-like extensions of the Volga reservoirs

и водохранилищ в интересах лесосплава, энергетики, судоходства, водоснабжения, рыболовства и рекреации.

Рассчитаны ориентировочные (по разности между известными статьями) и замкнутые (где все составляющие определены) седиментационные балансы и их динамика (табл. 6).

Таблица 6. Средние балансы взвешенных наносов водохранилищ Волги за период 1937–2025 гг., %

Table. 6. Average suspended sediment balances of the Volga reservoirs for the period 1937–2025, %

Основные составляющие	Приход	Основные составляющие	Расход
Абразия, эрозия	71 (47–86)	Осадконакопление	78 (62–96)
Сток речных наносов	26 (10–46)	Сток наносов через гидроузел	22 (4–48)
Продукция гидробионтов	3 (1–6)		
Всего	100	Всего	100

Все статьи приведенных балансов водохранилищ недостаточно точны, поэтому разброс от средних значений довольно значительный, что указывает на их индивидуальные особенности. На примере отдельных замкнутых балансов взвешенных наносов (Угличское, Горьковское, Куйбышевское, Волгоградское водохранилища) оценка точности расчета отдельных статей показала, что имеющиеся невязки от 3,2 % в Горьковском до 10,8 % в Куйбышевском не превосходят возможные ошибки их определения. Это обстоятельство позволяет считать, что они достаточно верно отражают ход абиотических и биотических процессов в рассматриваемых водоемах.

Осадкообразование – это завершающий процесс седиментации автохтонных и аллохтонных, абиотических и биотических, минерально-органо-химических компонентов, природных и антропогенных взвешенных веществ и на-

носов, способствующих естественному самоочищению воды. Таким образом, процесс седиментации – это первичная физическая стадия улучшения качества природных вод, далее следует физико-химическая, химическая и наиболее обширная по значимости – биологическая, которые взаимосвязаны и накладываются друг на друга и хорошо описаны в научной литературе [16–18].

Важнейшим гидроэкологическим фактором процесса осадкообразования является распределение и накопление илисто-глинистых отложений, т. к. только они депонируют весь комплекс природных органических и антропогенных загрязняющих веществ из различных источников и характеризуют продуктивность дна водных экосистем.

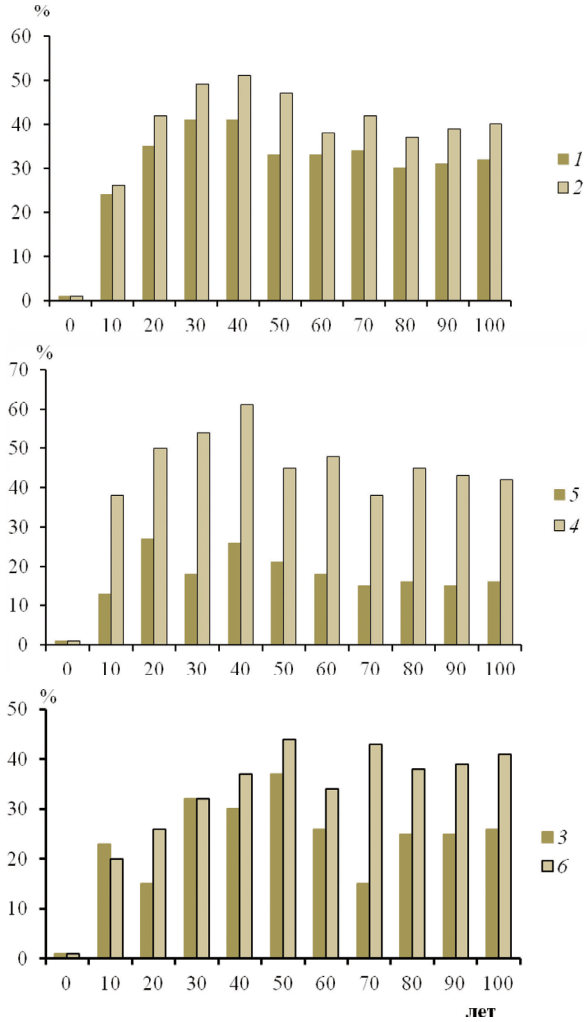


Рис. 5. Динамика и прогноз площадей илистых отложений в системе водохранилищ Волги: *1* – в целом по водохранилищам, *2* – озерные районы, *3* – мелководные заливы, *4* – приплотинные участки, *5* – речные районы, 6 – глубоководные заливы

Fig. 5. Dynamics and forecast of silt sediments areas in the Volga reservoir system: *1* – in general for reservoirs, *2* – lake areas, *3* – shallow bays, *4* – dam areas, *5* – river areas, *6* – deep-water bays

Места накопления илов – участки водоемов, где наблюдается слабая динамика гидрологических процессов. Она способствует безвозвратному захоронению взвешенных органоминеральных и растворенных веществ различного происхождения (природных и антропогенных) гравитационно-сорбционным путем, а в экстремальных гидрометеорологических условиях – взмучиванию и вторичному загрязнению воды. Кроме того, илистые отложения являются средой обитания и пищевым объектом значительной группы гидробионтов – бактерий, грибов, бентоса и бентосоядных рыб. Динамика и прогноз площадей всех типов грунтов, в том числе илистых отложений, в системе водохранилищ Волги представлены на рис. 2, рис. 5.

Наибольшие различия отмечаются в речных районах (нижних бьефах) и открытых глубоководных заливах, где динамика изменения площадей илов зависит от морфометрических характеристик и величин твердого стока, поступающего с основной рекой Волгой через плотины и крупные реки с дельтами. Коэффициенты корреляции для них равны: $R^2_5 = 0{,}16$, $R^2_6 = 0{,}79$ при $n_5 = 90$, $n_6 = 40$ соответственно.

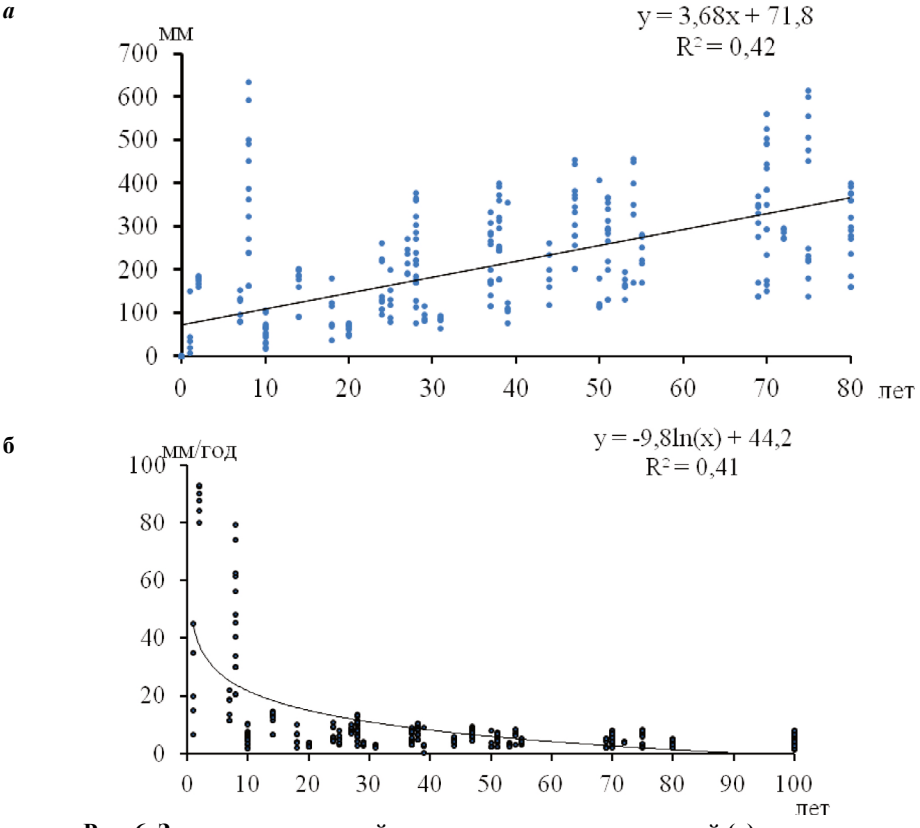


Рис. 6. Зависимость средней толщины илистых отложений (*а*) и интенсивность илонакопления (*б*) от продолжительности существования водохранилищ ($n = 360$)

Fig. 6. Dependence of the average thickness of silt sediments (*a*) and the intensity of silt accumulation (*b*) on the duration of reservoirs ($n = 360$)

Трансформация площадей донных осадков в целом по каскаду, отдельным районам и участкам происходит в период активизации эрозионно-абразионных процессов, повышенных темпов седиментации, затем наступает стабилизация, когда площади песчанистых и глинистых илов не меняются или происходит их слабая флуктуация в результате воздействия многолетних и сезонных природных и антропогенных факторов.

Зависимость увеличения площадей распределения илов в пространственно-временном аспекте не выражена, что вполне естественно, так как их ареалы формируются уже в первые годы существования водохранилищ и менее подвержены изменениям.

Мониторинговые материалы по осадконакоплению в водохранилищах Волжского каскада, включающие прямые определения толщины кернов (мм) и скоростей илонакопления (мм/год) позволили выявить значимые корреляционные связи во времени – $R^2 = 0{,}42$, 041 соответственно (рис. 6).

Согласно балансам взвешенных наносов (табл. 6), на дне водоемов накапливается от 62 до 96 % осадков. Из них примерно 10–50 % тонкодисперсных взвесей, поступающих с речным стоком и продукцией гидробионтов, формируя органоминеральный состав илов с концентрациями органического вещества от 5 % в песчанистых илах до 40 % в торфогенных. Сброс взвесей через гидросооружения находится в пределах от 4–5 % в Рыбинском и Куйбышевском до 50 % в Чебоксарском и Саратовском с высоким водообменом (Кв = 18–20). Все это подтверждает седименто-накопительную (депонирующую) функцию водоемов замедленного водообмена (Кв = 1,9–9,0) относительную стабильность формирования ложа и его структуры.

Максимальная мощность илистых отложений, зарегистрированных в Иваньковском водохранилище, составляет 120 см, Угличском – 85, Рыбинском – 300, Горьковском – 96, Чебоксарском – 110, Куйбышевском – 120, Саратовском – 65, Волгоградском – 85 см.

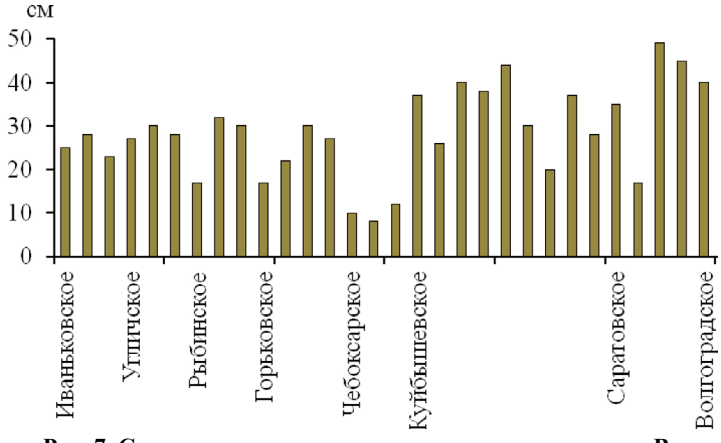


Рис. 7. Средняя толщина илов в системе водохранилищ Волги
Fig. 7. Average thickness of silt in the Volga reservoir system

По результатам грунтовых съемок, толщина слоя илов постепенно увеличивается от водохранилищ Верхней Волги к Нижней (рис. 7). В первую очередь это связано с увеличением мелкодисперсности частиц в береговых откосах, сложенных глинистой брекчией (бурый ил), известковисто-доломитовыми, глинисто-мергелистыми породами (белый ил), а также Хвалынской глиной и лесовидными суглинками, которые становятся преобладающими в зоне перехода от степной к полупустынной местности.

Сводка показателей илонакопления подтверждает, что средняя годовая потеря полного объема водохранилища за счет отложения илов невелика и не представляет каких-либо препятствий для эксплуатации равнинных водохранилищ в течение нескольких сотен лет. Однако с точки зрения влияния на гидрологические и гидрохимические процессы более важным показателем является интенсивность илонакопления и ее изменения в пространстве и во времени, описываемые уравнением гиперболического типа (рис. 6 *б*).

Характер пространственно-временного распределения и накопления тонкодисперсных отложений свидетельствует о том, что интенсивная стадия формирования ложа сменилась на пассивную.

Водохранилища и озера в их системе находятся под влиянием изменяющихся природных и техногенных факторов, поэтому мониторинг их состояния является неотъемлемой частью исследования по широкому спектру естественных наук.

ВЫВОДЫ

Закономерности осадкообразования в крупных равнинных водохранилищах и трансформация балансовых характеристик, выявленные на основании многоразовых грунтовых съемок, позволили установить общую направленность процессов формирования ложа и спрогнозировать их количественные характеристики.

В результате функционирования водных экосистем произошли значительные изменения в их грунтовом комплексе. На ранних стадиях они носили стохастический характер, зависивший от нестационарности природных явлений, нарушенных техногенным воздействием. По мере увеличения сроков эксплуатации искусственных водоемов изменения в структуре дна приобрели определенные тенденции. Так, постепенно утратили природный качественный состав размытые и разбухшие почвы в аквальных условиях по сравнению с их аналогами на суше. По мере развития высшей водной растительности появились острова-сплавины из отмерших макрофитов. Срастаясь с дном, они создают болотные ландшафты, отчуждая часть акватории. Продукты этих процессов в совокупности с продукцией фито- и зоопланктона обогащают все типы минеральных осадков органическим веществом, необходимым для жизнедеятельности гидробионтов. Таким образом, осуществляется малый геологиче-

ский круговорот в природе, поддерживающий функционирование как водных, так и наземных экосистем.

В толще осадков начинаются ранние стадии диагенеза, связанные с уплотнением и депонированием биогенных и загрязняющих веществ, поступивших из различных источников, который проявляется в виде суммарного геохимического эффекта в сочетании с продукционной жизнедеятельностью организмов. По В. И. Вернадскому, изучение физико-химических условий в пространственных системах (как на суше, так и в воде) с учетом геохимического – биотического фактора (живого вещества) приобретает особое значение [19]. Это направление должно стать ведущим в системе исследований в сопредельных средах: атмосфере – гидросфере – литосфере – биосфере.

Пути изменения грунтового комплекса водохранилищ характеризуются не только количественными параметрами – структурой площадей различных типов донных осадков, интенсивностью осадкообразования, но и качественными – органическим веществом, биогенными элементами и другими поллютантами.

Искусственные водоемы, в отличие от древних озерных систем, находятся в большей степени под влиянием неустоявшихся естественных и антропогенных факторов, а озера, вовлеченные в техногенные эксперименты, испытывают те же преобразования, что и озеровидные расширения водохранилищ, поэтому период их окончательной стабилизации наступит не скоро.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н. И. Экологическая гидрология и гидроэкология в системе наук // Гидроэкология: теория и практика. Вып. 2. М.: МГУ, 2004. С. 6–37.
2. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970. 440 с.
3. Буторин Н. В., Зиминова Н. А., Курдин В. П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 160 с.
4. Географические методы изучения экосистем внутренних водоемов (С. А. Поддубный, В. В. Законнов, А. В. Кутузов и др.) / отв. ред. С. А. Поддубный, Ярославль: Филигрань, 2024. 206 с. https://doi.org/10.47021/monography_653f94c6bc8.69020116
5. Законнов В. В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: автореф. дис. … докт. геогр. наук. М.: ИГРАН, 2007. 42 с.
6. Новиков Б. И. Донные отложения Днепровских водохранилищ. Киев: Наук. Думка, 1985. 172 с.
7. Шагидуллин Р. Р. Эколого-аналитический контроль равнинного водохранилища. Казань: Казан. ун-т, 2011. 336 с.
8. Законнов В. В. Течения и их роль в формировании наносов. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. 1. Гидро-геодинамические процессы. Управление водными ресурсами. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2017. С. 65–68.

9. Законнов В. В., Законнова А. В., Цветков А. И., Шерышева Н. Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Труды ИБВВ РАН, 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46.
10. Законнов В. В., Филиппов О. В., Баранова М. С., Кочеткова А. И., Законнова А. В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 8. Формирование берегов и ложа Волгоградского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 6. С. 6–28. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-6-1
11. Законнов В. В. Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Труды ИБВВ РАН, 2016. Вып. 75 (78). С. 30–40.
12. Законнов В. В., Законнова А. В. Изменение природной среды под воздействием водохранилищ. Комплексные исследования водохранилищ и их водосборов: сб. трудов, посв. 100-летию со дня рожд. Ю. М. Матарзина. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2024. С. 52–56.
13. Землянов И. В., Шикунова С. Ю., Горелиц О. В., Павловский А. С. Использование цифровой модели рельефа для уточнения современных морфометрических характеристик водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов // Труды межд. науч.-практ. конф. Пермь, 2011. С. 189–193.
14. Законнов В. В., Законнова А. В. Географическая зональность осадкообразования в системе волжских водохранилищ // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 2. С. 105–111.
15. Законнов В. В., Законнова А. В. Природно-техногенная трансформация озер и водохранилищ // Матер. III Межд. конф. «Озера Евразии». Казань, 2025. С. 391–395.
16. Остроумов С. А. О самоочищении водных экосистем // Антропогенное влияние на водные экосистемы. М.: МГУ, 2005. С. 94–119.
17. Titman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability // Ecology. 1996. Vol. 77. P. 350–363.
18. Wetzel R. G. Limnology: lake and river ecosystems. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 p.
19. Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1987. 340 с.

REFERENCES

1. Alekseevsky N. I. Ecological hydrology and hydroecology in the system of sciences. *Hydroecology: Theory and Practice*. *Issue 2.* M.: Moscow State University, 2004. Vol. 2. P. 6–13.
2. Kuznetsov S. I. Lake microflora and its geochemical activity. Leningrad: Science, 1970. 440 p.
3. Butorin N. V., Ziminova N. A., Kurdin V. P. Bottom sediments in the Upper Volga reservoirs. Leningrad: Nauka, 1975.160 p.
4. Geographical methods of studying ecosystems of inland reservoirs / ed. by S. A. Poddubny. Yaroslavl': Filigran' 2024. 206 p. https://doi.org/10.47021/monography_653f94c6bc8.69020116
5. Zakonnov V. V. Sedimentation in the reservoirs of the Volga cascade: abstract of the doctoral geographic thesis. Moskva. 39 p.
6. Novikov B. I. Bottom Sediments in the Dnieper reservoirs. Kiev: Naukova dumka, 1985. 169 p.
7. Shagidullin R. R. Environmental and analytical control of a flat reservoir. Kazan: Kazan University, 2011. 336 p.
8. Zakonnov V. V. Currents and their Role Information of Sediments. Modern Problems of Reservoirs and their Catchments. Vol. 1. Hydro-geodynamic processes. Water resources management. Perm: Perm State National University research, 2017. P. 65–68.
9. Zakonnov V. V., Zakonnova A. V., Tsvetkov A. I., Sherysheva N. G. Hydro-dynamic processes and their role in formation of the Volga-Kama reservoir cascade bottom sediments. *Proceedings of IBIW RAS*, 2018. Iss. 81 (84). P. 34–46.

10. Zakonnov V. V., Filippov O. V., Baranova M. S., Kochetkova A. I., Zakonnova A. V. Spatial and temporal transformation of the ground complex of the Volga reservoirs. Message 8. Formation of the banks and bottom of the Volgograd reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 6. P. 6–28. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-6-1
11. Zakonnov V. V. Silt accumulation in the Volga cascade Reservoir system. *Proceedings of IBIW RAS*, 2016. Iss. 75 (78). P. 30–40.
12. Zakonnov V. V., Zakonnova A. V. Changes in the natural environment caused by reservoirs. Comprehensive studies of reservoirs and their catchments. Collection of works dedicated to the 100th anniversary of the birth of Yu. M. Matarzin. Perm: Perm State National University, 2024. P. 52–56.
13. Zemlyanov I. V., Shikunova S. Yu., Gorelets O. V., Pavlovsky A. S. Using a digital elevation model to refine the current morphometric characteristics of reservoirs. *Modern problems of reservoirs and their catchments.* 2011. P. 189–193.
14. Zakonnov V. V., Zakonnova A. V. Geographical zonality of sediment formation in the system of the Volga reservoirs. *Proceedings of RAS. Series of Geography.* 2008. No. 2. P. 105–111.
15. Zakonnov V. V., Zakonnova A. V. Natural and technogenic transformation of lakes and reservoirs. *Materials of III International conference «Lakes of Eurasia»*. Kazan, 2025. P. 391–395.
16. Ostroumov S. A. On the self-purification of aquatic ecosystems. *Anthropogenic Impact on aquatic Ecosystems*. M.: Moscow State University, 2005. P. 94–119.
17. Titman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability. *Ecology.* 1996. Vol. 77. P. 350–363.
18. Wetzel R. G. Limnology: lake and river ecosystems. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 p.
19. Vernadsky V. I. Chemical structure of the Earth's biosphere and its environs. M.: Science, 1987. 340 p.

Сведения об авторе:

Законнов Виктор Васильевич, д-р геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина», Российская академия наук, Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 59, кв. 42; https://orcid.org/0000-0003-1621-6108; e-mail: zak@ibiw.ru

About the author:

Viktor V. Zakonnov, Dr. of Geography, Chief Researcher, Russian Academy of Sciences, I. D. Papanin Institute of Inland Waters Biology, Borok, 59-42, Nekouzskiy r-n, Yaroslav oblast, 152742, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1621-6108; e-mail: zak@ibiw.ru

Поступила в редакцию / Received 25.06.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 22.09.2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.

УДК 556.555.4

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-77-91

Оригинальная статья / Original paper

Тепловые балансы волжских водохранилищ

С. А. Поддубный

spod@ibiw.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение вклада составляющих теплового баланса позволяет выделить основные внешние факторы, влияющие на процессы накопления и расходования тепла водными массами водоемов. Проведенный анализ литературных источников за последнюю четверть века не выявил каких-либо работ по оценке теплового баланса внутренних водоемов и, в частности, волжских водохранилищ в современных условиях. Особенную актуальность такое исследование приобретает в связи с нарастающим вниманием к вопросам постепенного глобального потепления климата и его влияния на водную среду. **Методы.** Расчет теплового баланса проводился по стандартным методикам для безледоставного периода года. Среднемесячные тепловые балансы волжских водохранилищ рассчитывались для периода с 2001 по 2022 г., характеризующегося заметным повышением температуры воздуха на 1,4–1,8 °С, и для периода до потепления климата (до 1976 г.). Гидрометеорологические характеристики, необходимые для расчета составляющих теплового баланса, заимствованы из архива лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН, Рыбинской гидрометобсерватории, а также с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных за периоды эксплуатации водохранилищ. **Результаты.** Несмотря на определенные методические сложности в оценке отдельных составляющих балансов, можно заключить, что потепление климата повлияло на их структуру в современных условиях. Результирующий тепловой поток, проходящий через открытую водную поверхность, увеличился для водохранилищ в 1,5–16 раз. Основной вклад в теплосодержание водоемов вносит поступление тепла с втекающими водными массами. За счет увеличения теплового стока в современный период в ряде водохранилищ тепло, накапливаемое их водными массами с мая по октябрь, в большей степени расходуется.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водохранилища, тепловой баланс, составляющие баланса, водная масса, теплосодержание, тепловой сток, результирующий тепловой поток, невязка баланса

ФИНАНСИРОВАНИЕ: работа выполнена в рамках государственного задания № 124032100076-2.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Поддубный С. А. Тепловые балансы волжских водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 77–91; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-77-91; EDN: JSDEZA

© Поддубный С. А., 2026

Heat balances of the Volga reservoirs

Sergey A. Poddubny

spod@ibiw.ru

Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences

ABSTRACT

Relevance. The study of the contribution of the components of the heat balance makes it possible to determine the main external factors that affect the accumulation and dissipation of heat by water masses in water bodies. An analysis of literature sources over the past quarter century did not reveal any studies on the assessment of the heat balance of inland water bodies, particularly the Volga reservoirs, under modern conditions. Such study is especially important due to the growing attention to the issue of gradual global warming and its impact on the aquatic environment. **Methods.** The calculation of the heat balance was carried out using standard methods for the ice-free period of the year. The average monthly heat balances in the Volga reservoirs were calculated for the period from 2001 to 2022, characterized by a significant increase in air temperature by 1.4–1.8 °C and for the period before global warming (before 1976). The hydrometeorological characteristics necessary for calculating the components of the heat balance were taken from the archive of the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry, Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, the Rybinsk Hydrometeorological Observatory, and at the website of the Russian Federal Research Institute of Hydrometeorological Information-World Data Center for the periods of the reservoir operation. **Results.** Despite certain methodological difficulties in assessing particular components of the balances, it can be concluded that climate warming has affected their structure in modern conditions. The resulting heat flow passing through the open water surface increased by 1.5 to 16 times for the reservoirs. The heat input from in flowing water masses made the main contribution to the heat content of water bodies. Due to the increase in heat flow during the modern period, the heat accumulated by the water masses from May to October is largely expended in some reservoirs.

KEYWORDS: reservoirs, heat balance, balance components, water mass, heat content, heat sink, net heat flow, balance discrepancy

FINANCING: The study was carried out within the framework of the state assignment No. 124032100076-2.

FOR CITATION: Poddubny S. A. Heat balances of the Volga reservoirs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 5. P. 77–91; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-77-91; EDN: JSDEZA

ВВЕДЕНИЕ

Процессы внешнего теплообмена озер и водохранилищ определяют структуру их теплового баланса в разные периоды годового термического цикла. Изучение вклада составляющих теплового баланса позволяет выделить основные внешние факторы, влияющие на процессы накопления и расходова-

ния тепла водными массами водоемов [1]. Рассматривая вопросы, связанные с оценкой составляющих теплового баланса, можно выделить, на наш взгляд, наиболее значимые, которым в настоящее время уделяется основное внимание. Во-первых, это касается исследования особенностей радиационного баланса водной поверхности – важной характеристики термодинамического режима, обусловливающей поступление тепла в водоемы [2, 3]. К другим по значимости вопросам можно отнести изучение теплообменных процессов, включающих оценку потерь тепла при испарении и турбулентного теплообмена на границе вода – воздух. Оценка потерь тепла на испарение может основываться на расчетных методах с использованием эмпирических формул[1], регрессионных и математических моделей с учетом изменения теплозапаса водоема [4–6], а также на прямых наблюдениях за метеорологическими параметрами на автономных буйковых станциях (платформах) с оценкой тепловых потоков на границе вода – воздух [2, 7–9]. К важной составляющей теплового баланса водоемов можно отнести и тепло, приносимое с водой притоков. Эта составляющая учитывается для небольших водохранилищ, в которых сток через гидроэлектростанцию составляет более 50 % от общего объема притока в водоем. В этих случаях вклад переносимого водой тепла в тепловом балансе может достигать 25 % [10].

Применительно к озерам и водохранилищам полностью тепловой баланс рассчитывался для оз. Белое [11], Рыбинского водохранилища [7], Камского водохранилища [2] и для отдельных участков Куйбышевского водохранилища [12] соответственно за периоды с 1951 по 1973 г., с 1948 по 1964 г., с 1966 по 1979 г. и с 1965 по 1971 г.

Следует отметить, что проведенный анализ литературных источников за последнюю четверть века не выявил каких-либо работ по оценке теплового баланса внутренних водоемов и, в частности, волжских водохранилищ в современных условиях. Особенную актуальность такое исследование приобретает в связи с нарастающим вниманием к вопросам постепенного глобального потепления климата и его влияния на водную среду.

Таким образом, цель настоящей работы – расчет тепловых балансов и оценка их составляющих для водохранилищ Волжского каскада в разные периоды климатического воздействия на Европейскую часть России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет теплового баланса проводился в соответствии с рекомендациями В. М. Мишона[1], Т. В. Одровой[2], К. К. Эдельштейна[3], «Руководства по гидро-

1 Мишон В. М. Практическая гидрофизика. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 177 с.
2 Одрова Т.В. Гидрофизика водоемов суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 312 с.
3 Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. М.: Издательство «Перо», 2014. 399 с.

логическим расчетам при проектировании водохранилищ»[4], «Указаний по расчету испарения с поверхности водоемов»[5] для безледоставного периода года. Среднемесячные тепловые балансы волжских водохранилищ рассчитывались для периода с 2001 по 2022 г., характеризующегося заметным повышением температуры воздуха на 1,4–1,8 °С, и для периода до потепления климата – с начала ввода в эксплуатацию водоемов (1937–1971 гг.) до 1976 г. [13]. Гидрометеорологические характеристики, необходимые для расчета составляющих теплового баланса (температура поверхности воды и водной массы, скорость ветра, температура воздуха, общая и нижняя облачность, упругость водяного пара, осадки), заимствованы из архива лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН, Рыбинской гидрометобсерватории, а также с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [14]. Необходимо отметить, что за весь период эксплуатации (с 1947 г. по настоящее время) Рыбинское водохранилище в наибольшей степени обеспечено гидрометеорологической информацией. Для остальных водохранилищ каскада отмечался дефицит гидрологической информации, кроме данных по объему притока в водоемы. В связи с этим такие важные гидрологические параметры, как средняя температура водной массы ($T_{вм}$) и средняя температура поверхностного слоя воды ($T_{пов}$), рассчитывались по полученным ранее регрессионным зависимостям $T_{вм} = f(T_{возд})$ и $T_{вм} = f(T_{пов})$, где $T_{возд}$ – температура воздуха (табл. 1) [13].

Таблица 1. Регрессионные зависимости между гидрометеорологическими параметрами волжских водохранилищ в безледный период (*n* – число членов ряда) [13]

Table 1. Regression relationships between hydrometeorological parameters of the Volga reservoirs during the ice-free period (*n* is the number of series members) [13]

Водохранилище, пункт наблюдений	$T_{вм} = f(T_{возд})$	*n*	R^2
Иваньковское, Тверь	$T_{вм} = 1{,}157 \cdot T_{возд} - 0{,}091$	182	0,95
Угличское, Углич	$T_{вм} = 4{,}64 + 0{,}836 \cdot T_{возд}$	114	0,68
Рыбинское, Рыбинск, ГМО	$T_{вм} = 1{,}437 + 0{,}957 \cdot T_{возд}$	287	0,82
Горьковское, Юрьевец	$T_{вм} = 0{,}848 + 1{,}00037 \cdot T_{возд}$	70	0,84
Куйбышевское, Вязовые	$T_{вм} = 3{,}26 + 0{,}863 \cdot T_{возд}$	30	0,73
Саратовское, Самара	$T_{вм} = 5{,}64 + 0{,}614 \cdot T_{возд}$	30	0,46
Волгоградское, Камышин	$T_{вм} = 5{,}71 + 0{,}634 \cdot T_{возд}$	30	0,52
Для всех водохранилищ	$T_{вм} = 0{,}679 + 0{,}983 \cdot T_{пов}$ $T_{пов} = (T_{вм} - 0{,}679) / 0{,}983$	571	0,94

4 Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 284 с.

5 Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.

Уравнение теплового баланса записывалось в следующем сокращенном виде с учетом основных его составляющих, характеризующих среднюю за расчетный период интенсивность тепловых потоков в Вт/м^2:

$$\Theta_р \pm \Theta_{эф} \pm \Theta_{ис} \pm \Theta_{то} + \Theta_{ос} \pm \Theta_д + \Theta_{прит} - \Theta_{ст} = \pm \Delta\Theta, \quad (1)$$

где $\Theta_р$ – поглощенная водой суммарная солнечная радиация; $\Theta_{эф}$ – эффективное излучение; $\Theta_{ис}$ – затраты тепла на испарение; $\Theta_{то}$ – турбулентный теплообмен воды с атмосферой; $\Theta_{ос}$ – поступление тепла с жидкими осадками; $\Theta_д$ – теплообмен с донными грунтами; $\Theta_{прит}$ – тепловой приток в водоем; $\Theta_{ст}$ – тепловой сток из водоема; $\Delta\Theta$ – изменение теплозапаса.

Расчет составляющих теплового баланса проводился по следующим формулам:

$$\Theta_р = (Q + q)_0[1 - nK_н N_н - nK_{с+в}(N_о - N_н)(1 - r)/(1 - \gamma r)] \quad (2)$$

$$\Theta_{эф} = 0{,}95\sigma(273{,}2 + T_0)^4 - \sigma(273{,}2 + T_{200})^4(b_1 + b_2) \quad (3)$$

$$\Theta_{ис} = 4{,}1(E_0 - E_{200})[1 + 0{,}8U_{200} + f(\Delta\vartheta)] \quad (4)$$

$$\Theta_{то} = 2{,}65(T_{200} - T_0)[1 + 0{,}8U_{200} + f(\Delta\vartheta)] \quad (5)$$

$$\Theta_{ос} = 0{,}0485 \cdot T_{200} \cdot h \quad (6)$$

$$\Theta_{прит} = c_р \rho Q_{прит} T_{прит}/S \quad (7)$$

$$\Theta_{ст} = c_р \rho Q_{ст} T_{ст}/S \quad (8)$$

$$\Delta\Theta = c_р \rho(H_{ср\,к} T_{вм\,к} - H_{ср\,н} T_{вмн})/\tau \quad (9)$$

В используемых формулах приняты следующие обозначения: $(Q + q)_0$ – суммарная радиация на уровне моря при безоблачном небе; n – относительная плотность облачного покрова; $N_н$ и $N_о$ – соответственно облачность нижнего и верхнего ярусов в долях единицы; $K_н$ и $K_{с+в}$ – коэффициенты, характеризующие непропускание суммарной радиации облаками нижнего, среднего и верхнего ярусов; r – среднесуточное альбедо водной поверхности; γ – коэффициент, характеризующий долю повторно рассеянной и отраженной облаками в направлении к поверхности воды радиации: $\gamma = 0{,}3 + 0{,}5N_н + 0{,}42(N_о - N_н)$; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 K^4$); T_0 – температура поверхности воды, °С; T_{200} – температура воздуха на 2 м над водой, °С; b_1 и b_2 – коэффициенты, характеризующие влияние облачного покрова нижнего и верхнего ярусов на встречное излучение атмосферы; E_0 – максимальная упругость водяного пара, мбар; E_{200} и T_{200} – упругость водяного пара (мбар) и температура воз-

духа (°С) на высоте 2 м над водоемом; T_0 – температура поверхности воды; U_{200} – скорость ветра на высоте 2 м над водоемом, м/с; $f(\Delta\vartheta)$ – функция, учитывающая изменение интенсивности испарения за счет разности значений T_0 и T_{200}; h – слой жидких осадков за сутки, мм; $c_р$ – удельная теплоемкость воды 4190 Дж/(кг·°С); ρ – плотность воды 1000 кг/м^3; $H_{срк}$, $T_{вмк}$ и $H_{срн}$, $T_{вмн}$ – соответственно средняя глубина и температура воды в конце и начале периода наблюдений при данном уровне воды Z, м балтийской системы (БС); $Q_{прит}$ и $Q_{ст}$ – средние значения расходов воды притока и стока, м^3/с; $T_{прит}$ и $T_{ст}$ – средние значения температуры воды притока и нижнего бьефа гидроузла, °С; S – площадь водоема, м^2.

Значения указанных параметров и коэффициентов, включая теплообмен с донными грунтами ($\Theta_д$), заимствованы из соответствующих таблиц[4,6].

Таблица 2. Тепловые балансы Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ в период до 1976 г. (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м^2)

Table 2. Heat balances of the Ivankovo, Uglich and Rybinsk reservoirs in the period up to 1976 (heat flow intensity is given in W/m^2)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
Иваньковское водохранилище									
V	190	80	270	85	47	73	206	43	21
VI	214	60	274	121	73	51	245	37	−6
VII	201	56	256	113	79	39	231	13	15
VIII	158	39	196	78	87	24	189	−8	17
IX	99	26	125	50	80	15	145	−31	17
X	48	17	65	26	53	9	88	−37	26
$\sum_{сезон}$	909	277	1186	474	419	212	1104	17	90
%	77	23	100	43	38	19	100	1,4	7,6
Угличское водохранилище									
V	183	128	312	72	34	113	219	84	9
VI	212	85	298	111	70	83	264	29	5
VII	200	67	267	125	66	67	258	14	−5
VIII	162	45	207	111	67	49	227	−13	−7
IX	94	27	121	93	65	33	191	−36	−34
X	44	17	61	56	53	26	136	−41	−34
$\sum_{сезон}$	896	370	1266	569	355	372	1295	37	−66
%	70	30	100	44	27	29	100	2,9	5,2
Рыбинское водохранилище									
V	196	25	221	40	84	8	132	81	8
VI	221	15	236	97	89	14	200	37	−1
VII	213	11	224	122	83	17	222	6	−4
VIII	156	8	164	111	79	16	206	−32	−10
IX	89	5	94	81	75	11	167	−56	−17
X	37	3	40	47	58	5	110	−55	−15
$\sum_{сезон}$	912	66	978	498	467	72	1037	−19	−39
%	93	7	100	48	45	7	100	1,9	4,0

6 Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование термического режима водохранилищ определяется теплообменом между водной массой и атмосферой, а также перераспределением тепла внутри водной толщи водоемов. Кроме того, на термический режим водохранилищ оказывают влияние морфометрические характеристики – глубина, площадь водной поверхности и объем. Рассмотрим основные составляющие теплового баланса волжских водохранилищ в указанные периоды разного климатического воздействия на их водную среду.

Предварительная оценка составляющих баланса (1) показала, что в его приходной части вклад $\Theta_д$, $\Theta_{то}$ и $\Theta_{эф}$ для двух климатических периодов крайне незначителен (0,3–5 %) и, следовательно, ими можно пренебречь без существенной потери точности расчета баланса. В расходной части теплового баланса указанные выше составляющие характеризуются несколько большим

Таблица 3. Тепловые балансы Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ в период с 2001 по 2022 г. (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м²)

Table 3. Heat balances of the Ivankovo, Uglich and Rybinsk reservoirs during the period from 2001 to 2022 (heat flow intensity is given in W/m²)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
Иваньковское водохранилище									
V	197	78	276	110	57	81	249	47	−20
VI	210	64	274	129	81	69	278	19	−23
VII	202	53	254	143	99	58	300	20	−66
VIII	163	42	205	110	37	46	193	−14	30
IX	97	40	138	62	26	41	129	−36	50
X	49	29	79	19	2	23	44	−42	90
$\sum_{сезон}$	919	307	1226	573	303	318	1193	−6	61
%	74	26	100	48	25	27	100	0,5	5,0
Угличское водохранилище									
V	195	32	227	103	67	57	227	50	–50
VI	209	34	243	96	63	45	203	21	19
VII	202	31	232	93	50	40	183	21	28
VIII	162	32	194	81	15	39	135	−14	73
IX	95	29	124	69	46	36	151	−35	8
X	47	28	75	55	43	42	140	−44	−21
$\sum_{сезон}$	909	185	1094	497	284	259	1041	−1	57
%	83	17	100	48	27	25	100	0,1	5,2
Рыбинское водохранилище									
V	193	17	210	64	38	8	110	57	43
VI	208	13	221	128	48	14	190	56	−25
VII	201	12	213	149	55	18	222	34	−43
VIII	160	9	169	150	56	18	224	−4	−51
IX	91	6	97	86	42	12	140	−46	3
X	43	5	48	58	30	7	95	−40	−7
$\sum_{сезон}$	896	62	958	635	269	78	982	57	−80
%	94	6	100	65	27	8	100	5,9	8,4

вкладом (1–30 %), и в дальнейшем целесообразно учитывать только их сумму: $\Theta_0 = \Theta_д + \Theta_{то} + \Theta_{эф}$.

Согласно проведенным расчетам, в период до 1976 г. и в современный период потепления климата 64–92 % в приходной части баланса составляет поглощенная водой солнечная радиация (2). Для водохранилищ Верхней Волги суммарные за сезон $\Theta_р$ близки по величине (896–949 Вт/м^2). Отмечена крайне незначительная (на 1–4 %) тенденция увеличения $\Theta_р$ после 2000 г. за счет некоторого уменьшения общей и нижней облачности (табл. 2, 3).

На средней и нижней Волге в современный период увеличение $\Theta_р$ составило 4–6 % также за счет уменьшения общей облачности и облачности нижнего яруса (табл. 4–6).

Таблица 4. Тепловые балансы Горьковского, Куйбышевского и Саратовского водохранилищ в период до 1976 г. (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м^2)

Table 4. Heat balances of the Gorky, Kuibyshev, and Saratov reservoirs in the period up to 1976 (heat flow intensity is given in W/m^2)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
Горьковское водохранилище									
V	185	25	210	112	27	79	217	46	−53
VI	216	41	257	123	50	63	236	28	−7
VII	201	54	256	117	43	72	233	12	11
VIII	165	50	214	94	34	60	188	−11	37
IX	102	33	135	62	27	42	130	−35	40
X	45	19	64	39	10	23	73	−41	32
$\sum_{сезон}$	915	222	1137	548	192	337	1077	−1	60
%	80	20	100	51	18	31	100	0,1	5,3
Куйбышевское водохранилище									
V	215	172	388	152	59	216	428	111	−151
VI	238	118	356	158	53	112	323	54	−21
VII	223	84	307	144	42	84	270	22	15
VIII	189	65	254	128	45	69	243	−27	38
IX	125	44	169	101	43	46	190	−78	57
X	64	23	87	72	50	23	145	−93	35
$\sum_{сезон}$	1055	507	1562	755	292	550	1597	−11	−27
%	68	32	100	47	18	34	100	0,7	1,7
Саратовское водохранилище									
V	220	633	852	174	36	643	853	61	−62
VI	242	354	596	145	64	352	561	29	6
VII	231	282	513	128	38	252	419	12	82
VIII	196	230	426	128	24	212	364	−11	73
IX	133	148	281	121	27	148	295	−43	29
X	71	75	146	109	53	98	259	−56	−57
$\sum_{сезон}$	1092	1722	2814	806	241	1705	2752	−8	71
%	39	61	100	29	9	62	100	0,3	2,5

Таблица 5. Тепловые балансы Горьковского, Куйбышевского и Саратовского водохранилищ в период с 2001 по 2022 г. (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м²)

Table 5. Heat balances of the Gorky, Kuibyshev, and Saratov reservoirs during the period from 2001 to 2022 (heat flow intensity is given in W/m²)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
Горьковское водохранилище									
V	200	22	223	111	53	82	246	47	−70
VI	219	41	260	100	61	65	227	20	13
VII	212	52	264	107	51	74	231	18	15
VIII	168	52	219	90	46	60	195	−13	37
IX	102	35	137	57	27	41	124	−35	48
X	48	19	67	29	10	18	57	−42	52
$\sum_{сезон}$	949	221	1170	493	249	339	1081	−4	95
%	81	19	100	46	23	31	100	0,3	8,1
Куйбышевское водохранилище									
V	223	214	438	129	60	222	410	99	−71
VI	242	138	380	133	56	135	325	42	13
VII	240	99	339	135	49	104	288	25	26
VIII	203	78	281	121	44	92	257	−18	42
IX	132	51	183	80	43	62	185	−70	68
X	67	26	93	48	63	32	143	−85	35
$\sum_{сезон}$	1107	606	1714	646	316	647	1608	−7	113
%	65	35	100	40	20	40	100	0,4	6,6
Саратовское водохранилище									
V	231	677	908	137	23	671	831	25	52
VI	251	399	650	119	15	419	554	18	78
VII	248	309	557	122	11	328	461	−9	105
VIII	216	259	474	118	3	267	388	−44	130
IX	142	198	340	102	–	186	288	−55	107
X	75	123	198	83	32	91	206	−112	104
$\sum_{сезон}$	1163	1964	3127	795	84	1963	2842	−177	576
%	37	63	100	28	3	69	100	6	18

Таблица 6. Тепловые балансы Волгоградского водохранилища в разные периоды климатического воздействия (интенсивность тепловых потоков дана в Вт/м²)

Table 6. Heat balances of Volgograd reservoir in different periods of climatic influence (heat flow intensity is given in W/m²)

Месяц	Составляющие баланса							ΔΘ	$N_{тб}$, %
	Приход			Расход					
	$\Theta_р$	$\Theta_{прит}$	$\sum_{приход}$	$\Theta_{ис}$	$\Theta_о$	$\Theta_{ст}$	$\sum_{расх}$		
До 1976 г.									
V	224	428	652	177	36	448	661	83	−92
VI	245	212	456	174	64	231	470	47	−61
VII	238	153	391	175	38	158	371	21	−1
VIII	203	132	335	163	24	140	327	−14	22
IX	143	92	235	145	24	95	264	−65	36
X	82	61	143	120	38	64	222	−87	8
$\sum_{сезон}$	1134	1078	2212	954	223	1137	2314	−14	−88

%	51	49	100	41	10	49	100	1	4
В период с 2001 по 2022 г.									
V	233	412	645	155	23	453	631	79	−65
VI	251	243	494	148	14	272	434	46	14
VII	250	188	438	154	10	210	374	28	36
VIII	221	157	378	151	3	180	334	−6	50
IX	149	121	270	121	–	137	258	−74	86
X	81	75	156	100	29	88	217	−84	23
$\sum_{сезон}$	1186	1196	2382	829	79	1340	2248	−12	144
%	50	50	100	37	4	60	100	1	6

Другой важной составляющей приходной части баланса служит тепло, поступающее с притоком в водоем ($\Theta_{прит}$). Вклад этой величины изменяется от 7 до 60 % и в основном зависит от объема притока. Необходимо отметить, что при расчете $\Theta_{прит}$ (7) до 1976 г. температура водной массы самого верхнего в каскаде Иваньковского водохранилища рассчитывалась как средняя величина температуры воды основных впадающих рек [15].

В дальнейшем для всех водохранилищ каскада $\Theta_{прит}$ вычислялась с учетом температуры водной массы, рассчитанной по регрессионным уравнениям (табл. 1) и поступающей из вышележащего водоема. Допускалось, что объем сброса через гидросооружения равен объему притока в водохранилища. Рассматривая процентное соотношение составляющих приходной части баланса, приходим к выводу, что с постепенным увеличением объема поступающего тепла в каждый нижерасположенный по каскаду водоем вклад $\Theta_р$ постепенно уменьшается.

Основная расходная часть теплового баланса водохранилищ Верхней Волги и Куйбышевского водохранилища – затраты тепла на испарение, достигающие 40–65 % от общего расхода тепла. На Саратовском и Волгоградском водохранилищах за счет увеличения поступления тепла с притоком воды вклад $\Theta_{ис}$ составляет 28–41 % (табл. 2–6). В целом по каскаду в современный период интенсивность испарения с поверхности водохранилищ меньше на 2–22 % (в среднем на 10 %) по сравнению с периодом до потепления климата. С другой стороны, на Рыбинском и Иваньковском водохранилищах испарение увеличилось после 2000 г. на 17–22 %.

Выявленные различия в затратах тепла на испарение для водохранилищ волжского каскада могут быть объяснены следующим образом. В современный период средняя скорость ветра, учитываемая в (4), согласно метеоданным, меньше на 14 % таковой, принятой для периода до потепления климата. Уменьшение вклада скорости ветра в итоге приводит к уменьшению интенсивности испарения для конкретного водоема. Далее, при расчете $\Theta_{ис}$ максимальная упругость водяного пара E_0 определяется по температуре поверхности воды, которая, в свою очередь, вычисляется по уравнениям регрессии (табл. 1). При этом ранее [13] было отмечено, что ошибки расчетов $T_{вм}$ и

$T_{пов}$ по указанным уравнениям могут достигать 20 %. Кроме того, неточности в расчете $\Theta_{ис}$ также могут быть связаны со сложностью выбора коэффициентов, характеризующих особенности берегового расположения метеостанций относительно водоема и используемых при расчете скорости ветра на высоте 2 м над водной поверхностью.

Таким образом, полученные величины интенсивности испарения для волжских водохранилищ следует считать ориентировочными, требующими дальнейшей более детальной корректировки. Наиболее низкая точность расчетов затрат тепла на испарение и турбулентного теплообмена между поверхностью водоемов и атмосферой отмечалась также ранее при проведении комплексных исследованиях водной среды ряда озер Северо-Запада России [11].

Тепловой сток из водохранилищ, как значимая составляющая расходной части их теплового баланса, оказывает существенное влияние на термический режим каждого нижележащего по каскаду водоема, а в суммарном выражении – на термику Северного Каспия. Согласно расчетам, адвективный теплообмен волжских водохранилищ в современный период в сравнении с периодом до потепления климата в среднем увеличился на 11 % в соответствии с аналогичным увеличением стока из водоемов на 2–14 % (табл. 7).

Таблица 7. Отношение среднего объема притока ($Q_{ср\ прит}$) к объему водохранилища (W)
Table 7. Ratio of the average inflow volume ($Q_{averinf}$) to the reservoir volume (W)

Водохранилище	W, км^3	До 1976 г.		После 2000 г.	
		$Q_{ср\ прит}$, км^3	$Q_{ср\ прит}$ / W, %	$Q_{ср\ прит}$, км^3	$Q_{ср\ прит}$ / W, %
Иваньковское	1,1	0,6	57	0,7	65
Угличское	1,2	0,7	56	0,8	64
Рыбинское	25,4	2,4	10	2,3	9
Горьковское	8,8	3,9	44	4,3	49
Куйбышевское	57,3	21,8	38	24,8	43
Саратовское	12,9	21,1	164	22,8	177
Волгоградское	31,4	22,1	70	22,6	72

В целом величина потерь тепла за счет стока во всех водохранилищах определяется соотношением объема стока и объема самого водоема. При относительно небольшом объеме стока по сравнению с объемом водоема (Рыбинское водохранилище) адвективные потери тепла минимальные. В случае объема стока, близкого к объему водохранилища или превышающего его, тепловой сток в нижний бьеф составляет 19–40 % от расходной части теплового баланса. Наибольший же вынос тепла происходит из Саратовского и Волгоградского водохранилищ (49–69 % от расходной части баланса) (табл. 5–6).

Результирующий тепловой поток, проходящий через открытую водную поверхность, определяемый уравнением: $\Theta_{рез} = \Theta_р - \Theta_{эф} - \Theta_{ис} - \Theta_{то}$, увеличился для верхневолжских водохранилищ в 1,5–16 раз, для Куйбышевского и Сара-

товского водохранилищ соответственно в 3 и 7,4 раза. В Волгоградском водохранилище $\Theta_{рез}$ до 1976 г. близок к нулю, а в современный период выявлено его существенное увеличение (рис. 1).

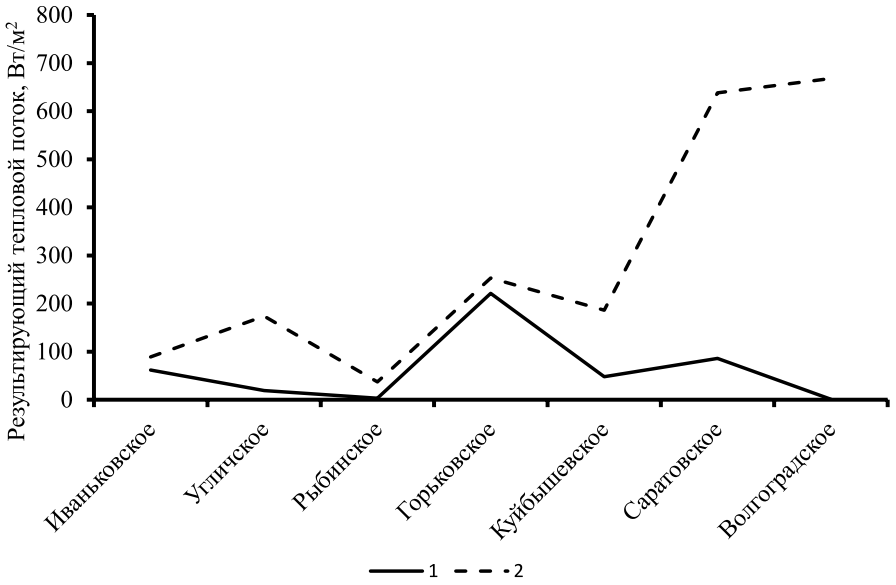


Рис. 1. Результирующий тепловой поток, проходящий через открытую водную поверхность водохранилищ $\Theta_{рез}$, Вт/м². 1 – до 1976 г., 2 – после 2000 г.

Fig. 1. The resulting heat flow passing through the open water surface of reservoirs Θ_{res}, W/m². 1 – before 1976, 2 – after 2000

Уравнение теплового баланса замыкается величиной изменения теплозапаса всей массы воды водоемов. При этом на сбалансированность всех составляющих теплового баланса указывает величина невязки ($N_{тб}$, %), которая включает ошибки определения отдельных учтенных элементов баланса и его неучтенные элементы. Кроме того, из-за сложности режима метеорологических элементов и других переменных, записанных в левой части уравнения (1), точность их расчета может не поддаваться достоверной оценке, т. к. расчетные значения составляющих нельзя сопоставить с измеренными величинами [12].

В результате немногочисленных работ по расчету тепловых балансов было показано, что его невязки могут составлять от 5 до 50 % [2, 7, 11]. Проведенные расчеты тепловых балансов волжских водохранилищ показали разброс невязок от 1,7 до 7,6 % для периода до 1976 г. и 5–8,4 % для периода после 2000 г., что указывает в целом на удовлетворительную сбалансированность составляющих баланса. Исключение составила невязка теплового баланса Саратовского водохранилища в современный период с величиной 18 %, что может быть связано с ограниченным количеством необходимой гидрометеорологической информации.

ВЫВОДЫ

Проведенный расчет тепловых балансов волжских водохранилищ позволил сделать следующие выводы. В целом, допуская определенные методические сложности в оценке отдельных составляющих балансов, можно заключить, что потепление климата повлияло на их структуру в современных условиях.

Вклад $\Theta_{рез}$ в формирование теплового режима водохранилищ во все рассматриваемые периоды в среднем не превышает 10 %. Основной вклад в теплосодержание водоемов вносит поступление тепла с втекающими водными массами. Для верхневолжских водохранилищ он составляет в среднем 18 %, а для водохранилищ Средней и Нижней Волги – 48 %.

За счет увеличения теплового стока в современный период в ряде водохранилищ тепло, накапливаемое их водными массами с мая по октябрь, в большей степени расходуется. В Рыбинском водохранилище тепло аккумулируется, а в Куйбышевском потери тепла сокращаются, что связано, как указывалось ранее, с соотношением притока в водоем и его объема.

Разброс невязок тепловых балансов для волжских водохранилищ от 1,7 до 8,4 %, несмотря на их приемлемые значения, все же, на наш взгляд, указывает на объективную сложность в достоверной оценке таких балансов для простых и сложных в морфометрическом отношении водоемов. Проведенные оценки тепловых балансов волжских водохранилищ следует рассматривать как ориентировочные, требующие дальнейших уточнений с использованием более полной гидрометеорологической информации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука,1991. 176 с.
2. Гидрологический режим Камского водохранилища / подред. А. Б. Китаева. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2020. 463 с.
3. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцева. М: Российская академия наук, 2021. 637 с. https://doi.org/10.12731/978-5-907366-50-3
4. Duan Z., Bastiaanssen W. G. M. A new empirical procedure for estimating intra-annual heat storage changes in lakes and reservoirs: review and analysis of 22 lakes // Remote sensing of environment. 2015. Vol. 156. P. 143–156. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.009
5. Duan Z., Bastiaanssen W. G. M.Evaluation of three energy balance-based evaporation models for estimating monthly evaporation fo five lakes using derived heat storage changes from a hysteresis model // Environmental Research Letters. 2017. Vol. 12. No. 2. Art. 024005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa568e

6. Panin G. N., Grechushnikova M. G., Puklakov V. V. Adapting a Model of Heat and Mass Exchange between a Water Body and the Atmosphere Taking into Account the Effect of Shallows: Case Study of the Ivankovo Reservoir // Water Resources. 2011. Vol. 38. No. 6.P. 818–826. https://doi.org/10.1134/S0097807811060133
7. Зайцева Е. А. Уточнение составляющих теплового баланса Рыбинского водохранилища // Сборник работ Рыбинской ГМО. Л: Гидрометеорологическое издательство, 1969. С. 11–21.
8. Pierre A., Nadeau D. F., Thiboult A., Rousseau A. N., Tremblay A., Isabelle P.-E., Anctil F. Characteristic time scales of evaporation from a subarctic reservoir // Hydrological Processes. 2023. Vol. 37. No. 3. P. 1–16. https://doi.org/10.1002/hyp.14842
9. Spank U., Hehn M., Bernhofer C., Keller P., Roschorrek M. A season of eddy-covariance fluxes above an extensive water body based on observation from a floating platform // Boundary-Layer Meteorology. 2020. Vol. 174. No. 3. P. 433–464. https://doi.org/10.1007/s10546-019-00490-z
10. Pierre A., Nadeau D. F., Thiboult A., Rousseau A. N., Anctil F., Deblois Ch. P., Demarty M., Isabelle P.-E., Tremblay A. Does the operation of a reservoir alter its interactions with the atmosphere? Investigating the role of advective fluxes on energy and hydrological balances of the Romaine-2 subarctic hydropower reservoir // Journal of Hydrometeorology. 2024. Vol. 25. No. 3. P. 391–411. https://doi.org/10.1175/JHM-D-23-0149.1
11. Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Часть I. Гидрология и гидрохимия озера Белого. Л.: Наука, 1981. 250 с.
12. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 270 с.
13. PoddubnyiS. A., Zakonnova A. V., Tsvetkov A. I., Trofinmenko L. T., Shvets N. V. Current Hydrological Regime of the Volga Reservoirs // WaterResources. 2023. Vol. 50. No. 3. P. 345–357. https://doi.org/10.1134/S0097807823030107
14. Веселов В. М., Прибыльская И. Р., Мирзеабасов О. А. Специализированные массивы для климатических исследований [Электр. ресурс] // Copyright© 2000–2011–2018–2024 ВНИИГМИ-МЦД / WebАисори-М: http://meteo.ru/services/data-providing/ (дата обращения: 19.08.2025).
15. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 23. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 629 с.

REFERENCES

1. Boyarinov P. M., Petrov M. P. Processes of formation of thermal regime of deep freshwater reservoirs. Leningrad: Nauka, 1991. 176 p.
2. Hydrological regime of the Kama Reservoir / ed. by A. B. Kitaev. Perm: Perm State National Research University 2020. 463 p.
3. Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate / edited by S. A. Kondratyev, Sh. R. Pozdnyakov, V. A. Rumyantsev. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2021. 637 p. https://doi.org/10.12731/978-5-907366-50-3
4. Duan Z., Bastiaanssen W. G. M. A new empirical procedure for estimating intra-annual heat storage changes in lakes and reservoirs: review and analysis of 22 lakes. *Remote sensing of environment*. 2015. Vol. 156. P. 143–156. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.009
5. Duan Z., Bastiaanssen W. G. M. Evaluation of three energy balance-based evaporation models for estimating monthly evaporation fo five lakes using derived heat storage changes from a hysteresis model. *Environmental Research Letters*. 2017. Vol. 12. No. 2. Art. 024005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa568e
6. Panin G. N., Grechushnikova M. G., Puklakov V. V. Adapting a Model of Heat and Mass Exchange between a Water Body and the Atmosphere Taking into Account the Effect of Shallows: Case Study of the Ivankovo Reservoir. *Water Resources*. 2011.Vol. 38. No. 6.P. 818–826. https://doi.org/10.1134/S0097807811060133

7. Zaitseva E. A. Clarification of the components of the heat balance of the Rybinsk Reservoir // Collection of works of the Rybinsk Hydrometeorological Observatory. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1969. P. 11–21.
8. Pierre A., Nadeau D. F., Thiboult A., Rousseau A. N., Tremblay A., Isabelle P.-E., Anctil F. Characteristic time scales of evaporation from a subarctic reservoir. *Hydrological Processes*. 2023. Vol. 37. No. 3. P. 1–16. https://doi.org/10.1002/hyp.14842
9. Spank U., Hehn M., Bernhofer C., Keller P., Roschorrek M. A season of eddy-covariance fluxes above an extensive water body based on observation from a floating platform. *Boundary-Layer Meteorology*. 2020. Vol. 174. No. 3. P. 433–464. https://doi.org/10.1007/s10546-019-00490-z
10. Pierre A., Nadeau D. F., Thiboult A., Rousseau A. N., Anctil F., Deblois Ch. P., Demarty M., Isabelle P.-E., Tremblay A. Does the operation of a reservoir alter its interactions with the atmosphere? Investigating the role of advective fluxes on energy and hydrological balances of the Romaine-2 subarctic hydropower reservoir. *Journal of Hydrometeorology*. 2024. Vol. 25. No 3. P. 391–411. https://doi.org/10.1175/JHM-D-23-0149.1
11. Anthropogenic influence on large lakes of the North-West USSR. Part I. Hydrology and hydrochemistry of Lake Beloye. Leningrad: Nauka, 1981. 250 p.
12. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Kuibyshev and Saratov reservoirs. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 270 p.
13. Poddubnyi S. A., Zakonnova A. V., Tsvetkov A. I., Trofinmenko L. T., Shvets N. V. Current Hydrological Regime of the Volga Reservoirs. *Water Resources*. 2023. Vol. 50. No. 3. P. 345–357. https://doi.org/10.1134/S0097807823030107
14. Veselov V. M., Pribylskaya I. R., Mirzeabasov O. A. Specialized arrays for climate research [Electronic resource] // Copyright© 2000–2011–2018–2024 VNIIGMI-MCD / Web Aisori-M: http://meteo.ru/services/data-providing (accessed 08/19/2025).
15. Long-term data on the regime and resources of surface waters on land. Vol. 1. Iss. 23. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 629 p.

Сведения об авторе:

Поддубный Сергей Артурович, д-р геогр. наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией гидрологии и гидрохимии, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина» РАН, Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок; https://orcid.org/0000-0002-5793-3755; e-mail: spod@ibiw.ru

About the author:

Sergey A. Poddubny, Doctor of Geographical Sciences, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry, Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskiy raion, Yaroslavl oblast, 152742, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-5793-3755; e-mail: spod@ibiw.ru

Поступила в редакцию / Received 13.05.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 18.09.2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.

УДК 556.18:556.114(470.23) *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-92-108*

Оригинальная статья / Original paper

Особенности пространственно-временных изменений гидрофизических и гидрохимических характеристик воды в гидросистеме ГМЗ «Петергоф»

А. В. Горбунова[1], М. Л. Марков[2], Г. В. Пряхина[1], А. В. Козачек[1,3]

Alyona.gorbunowa2015@Yandex.ru

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Водоподводящая система фонтанов музея-заповедника «Петергоф» существует почти три века. Благодаря продуманной конструкции она стабильно работает при минимальном обслуживании, что долго объясняло отсутствие мониторинга ее водного режима. Однако в последние десятилетия растет антропогенная нагрузка, усиливается и влияние изменения климата. Для сохранения гидросистемы нужны адаптивные мероприятия на основе комплексных исследований всех звеньев гидрографической цепи. Подобных работ до сих пор не проводилось ввиду отсутствия финансирования и высокой трудоемкости традиционных методов. **Методы.** Вместе с тем современные экспресс-методы позволяют оперативно получать данные и оценивать состояние среды. Цель данной работы – оценка пространственно-временных изменений гидрофизических и гидрохимических характеристик воды в гидросистеме Петергофа под воздействием природных и антропогенных факторов по данным экспресс-методов за 2025 г. и зиму 2026 г. на четырех участках. **Результаты.** Показано, что в холодный период характеристики воды слабо меняются по длине системы и соответствуют водам ордовикского горизонта (+4…+6 °С, 317–357 мг/л, $\delta^{18}O$ −11,85…−11,99 ‰). В теплый период, начиная от Шинкарского пруда, температура возрастает почти в три раза, а минерализация в Английском пруду снижается более чем на 1/3 относительно родников. Наибольшие изменения гидрофизических показателей отмечены в нижних частях системы, где водосбор занят городской застройкой и садоводческими постройками. Научная значимость работы заключается в комплексной оценке трансформации родниковых вод по каскаду прудов и каналов с использованием экспресс-методов и относительных коэффициентов. Практическая ценность исследования состоит в выявлении объектов, требующих улучшения водообмена и санации водосборов для снижения загрязнений, что необходимо для устойчивого функционирования гидросистемы ГМЗ «Петергоф» и парка «Сергиевка».

© Горбунова А. В., Марков М. Л., Пряхина Г. В., Козачек А. В., 2026

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водоподводящая система фонтанов; температура; минерализация; pH; изотопный состав воды ($\delta^{18}O$, d-excess); экспресс-методы; относительные коэффициенты; урбанизация водосбора; ручьи Ижорской возвышенности; парк «Сергиевка».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Горбунова А. В., Марков М. Л., Пряхина Г. В., Козачек А. В. Особенности пространственно-временных изменений гидрофизических и гидрохимических характеристик воды в гидросистеме ГМЗ «Петергоф» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 92–108; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-92-108; EDN: DKDPUE

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» за предоставление технической базы и проведение изотопного анализа проб воды, а также ФГБУ «Государственный гидрологический институт» за содействие в интерпретации полученных данных. Авторы признательны сотрудникам кафедры гидрологии суши Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета за ценные консультации и поддержку на всех этапах выполнения работы. Отдельная благодарность выражается О. А. Григорьевой, М. О. Каспину, А. А. Кобе, В. Д. Куклевой, Е. Д. Молчановой и П. В. Погореловой за помощь в организации и проведении полевых исследований.

Characteristics of spatio-temporal changes in hydrophysical and hydrochemical water parameters in the hydrosystem of the Peterhof State Museum-Reserve

Alena V. Gorbunova[1], Mikhail L. Markov[2], Galina V. Pryakhina[1], Anna V. Kozachek[1,3]

Alyona.gorbunowa2015@Yandex.ru

[1] *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*
[2] *State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia*
[3] *Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The water supply system for the fountains of the Peterhof State Museum-Reserve has existed for nearly three centuries. Thanks to its well-designed construction, it has been functioning stably with minimal maintenance, which for a long time explained the absence of monitoring of its water regime. However, in recent decades, the anthropogenic load has been increasing, and the influence of climate change has also been growing. To preserve the hydrosystem, adaptive measures based on comprehensive studies of all links of the hydrographic chain are needed. Such studies have not been conducted so far due to lack of funding and the high labor intensity of traditional methods. **Methods.** At the same time, modern express methods allow for rapid data acquisition and assessment of the state of the environment. The aim of this work is to assess spatio-temporal changes in hydrophysical and hydrochemical water parameters in the

Peterhof hydrosystem under the influence of natural and anthropogenic factors, based on data obtained by express methods during 2025 and winter 2026 at four sections. **Results.** It is shown that in the cold period, water parameters change only slightly along the system and correspond to the waters of the Ordovician horizon (+4…+6 °C, 317–357 mg/L, $\delta^{18}O$ -11.85…-11.99 ‰). In the warm period, starting from the Shinkarsky Pond, the temperature increases almost threefold, and the mineralization in the English Pond decreases by more than one-third relative to the springs. The greatest changes in hydrophysical parameters were recorded in the lower parts of the system, where the catchment area is occupied by urban development and horticultural plots. The scientific significance of the work lies in the comprehensive assessment of the transformation of spring waters along the cascade of ponds and canals using express methods and relative coefficients. The practical value of the study consists in identifying objects that require improved water exchange and remediation of catchments to reduce pollution, which is necessary for the sustainable functioning of the hydrosystem of the Peterhof State Museum-Reserve and Sergiyevka Park.

KEYWORDS: fountain water supply system; temperature; mineralization; pH; water isotopic composition ($\delta^{18}O$, d-excess); express methods; relative coefficients; catchment urbanization; streams of the Izhora Upland; Sergiyevka Park.

FOR CITATION: Gorbunova A.V., Markov M.L., Pryakhina G.V., Kozachek A.V. Characteristics of spatio-temporal changes in hydrophysical and hydrochemical water parameters in the hydrosystem of the Peterhof State Museum-Reserve. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 5. P. 92–108; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-92-108; EDN: DKDPUE

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the Arctic and Antarctic Research Institute for providing the technical facilities and conducting isotopic analysis of water samples, as well as to the State Hydrological Institute for assistance in the interpretation of the obtained data. The authors are grateful to the staff of the Land Hydrology Department, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, for valuable consultations and support at all stages of the work. Special thanks are extended to O. A. Grigorieva, M. O. Kaspin, A. A. Koba, V. D. Kukleva, E. D. Molchanova, and P. V. Pogorelova for their assistance in organizing and conducting field studies.

ВВЕДЕНИЕ

Водоподводящая система фонтанов (ВПСФ) Государственного музея-заповедника (ГМЗ) «Петергоф», спроектированная и построенная под руководством инженера-гидравлика В. Г. Туволкова [1] в XVIII–XIX вв., на протяжении трех столетий обеспечивает питание фонтанов Петродворца. В последние десятилетия ВПСФ испытывает все возрастающее антропогенное воздействие из-за масштабной жилой застройки водосбора. Исчезновение в XX в. некоторых элементов гидрографической сети, сокращение площади бассейна, заиление и зарастание водоемов оказывают влияние на санитарное состояние водных объектов. Дополнительным вызовом становится изменение климата: участившиеся засушливые периоды, аномально теплые зимы и перестройка

внутригодового стока оказывают значительное влияние на формирование ресурсов гидросистемы.

Изучение отдельных элементов гидросистемы Петергофа началось в 1930-е годы, а в 1960-е годы проведено первое комплексное исследование директором ГМЗ «Петергоф» Н. И. Архиповым [2]. Традиции историко-архивного изучения системы продолжены в монографии А. Л. Потравнова и Т. Ю. Хмельник [3], обобщающей 300-летнюю эволюцию ВПСФ. С рубежа XX–XXI вв. историко-архивные работы дополнились натурными обследованиями верхней части ВПСФ, выполненными сотрудниками Государственного гидрологического института.

Научных статей о современном состоянии системы немного. Большинство из них носит прикладной или узкотематический характер: оценка воздействия современной застройки представлена в [4], состояние берегоукреплений одного из прудов проанализировано в [5], вопросы эксплуатации гидротехнических сооружений освещены в [6]. Геофизические методы применялись для мониторинга утечек из водоемов системы [7], гидрогеологические предпосылки ее функционирования рассмотрены в [8]. Биологические аспекты зарастания прудов изучены в [9]; для парка «Сергиевка» аналогичные оценки выполнены в [10, 11].

Пространственно-временная изменчивость гидрофизических и гидрохимических характеристик воды, особенно изотопного состава, остается при этом изученной фрагментарно. Настоящая работа восполняет этот пробел.

Целью данной работы является оценка пространственно-временных изменений гидрофизических и гидрохимических характеристик воды в гидросистеме ГМЗ «Петергоф» под воздействием различных природных и антропогенных факторов на основе данных, полученных экспресс-методами в течение 2025–2026 гг.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования были выбраны водоемы и водотоки, входящие в состав исторической водоподводящей системы фонтанов Петергофа, расположенной в границах двух административных территорий – Ленинградской области (верхняя часть водосбора) и Санкт-Петербурга (г. Петергоф). Система представляет собой сложный гидрографический комплекс, сформированный как естественными водотоками, так и искусственными сооружениями, и в настоящее время включает 16 прудов-накопителей, 9 каналов, 12 ручьев и рек, а также 135 гидротехнических сооружений (рис. 1). Основу питания системы формируют водотоки, берущие начало преимущественно из родников на склонах Ижорской возвышенности. Кроме ВПСФ, исследования проведены и на водных объектах расположенного вблизи ООПТ «Памятник природы «Парк «Сергиевка» (№ 28, рис. 1).

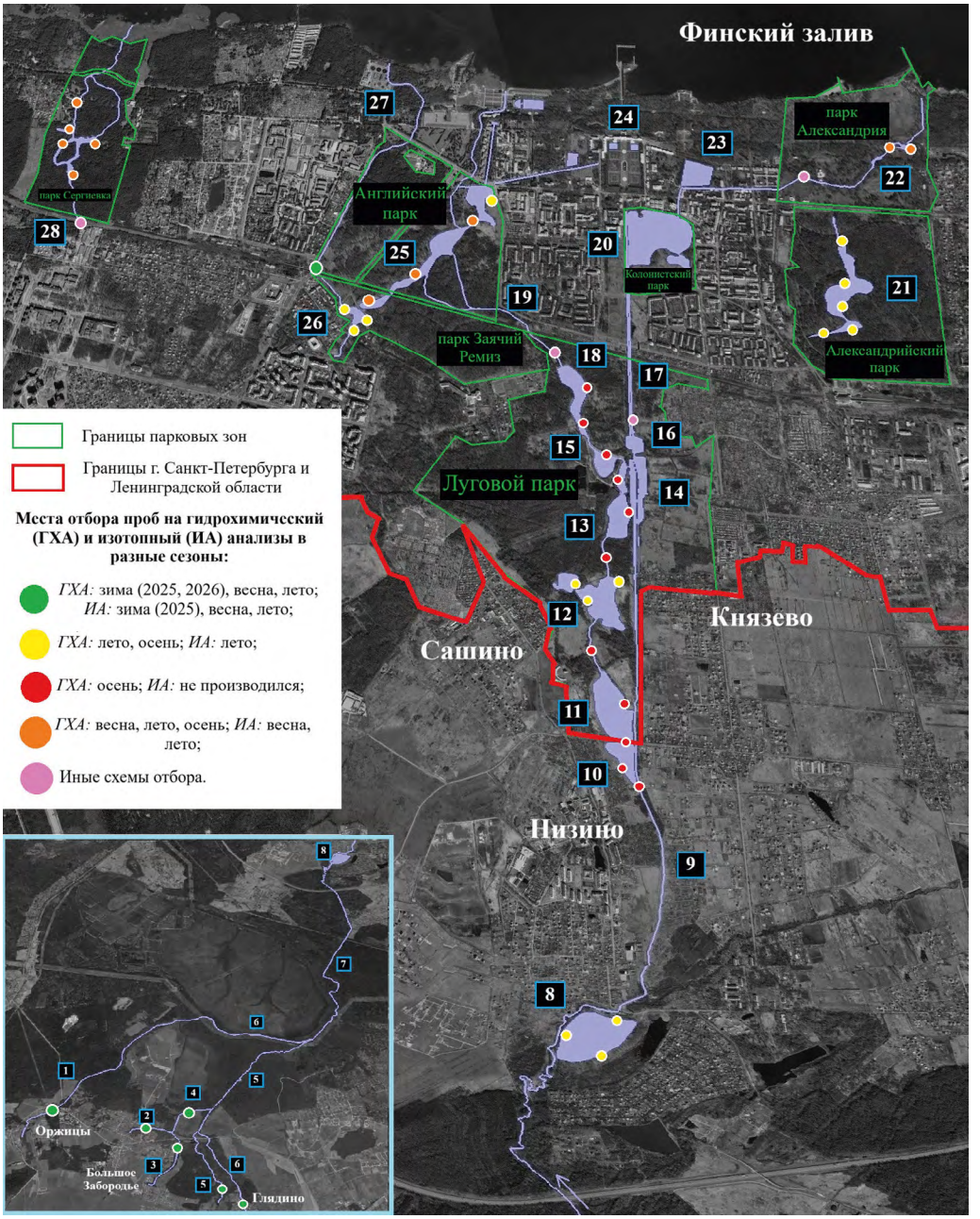


Рис. 1. Картосхема водоподводящей системы Петергофских фонтанов и места отбора проб на гидрохимический и изотопный анализы

Fig. 1. Map-scheme of the water supply system of the Peterhof fountains and sampling sites for hydrochemical and isotopic analyses

Цифрами на схеме обозначены: 1. Леваловский ручей; 2. Малый забородский ручей; 3. Большой забородский ручей; 4. р. Фабричная Речка; 5. Глядинский ручей; 6. Хабанский ручей; 7. р. Шингарка; 8. Новопетергофский канал; 9. Старопетергофский канал; 10. Шинкарский пруд; 11. Церковный пруд; 12. Бабигонский пруд; 13. Руинный и Саперный пруды; 14. Верхний и Нижний Орлиные пру-

ды; 15. Мельничный пруд; 16. Запасный пруд; 17. Круглый пруд; 18. Ольгинский канал и Самсониевский водовод; 19. Никольский пруд; 20. Ольгинский пруд; 21. Пролетарский пруд; 22. Александринский ручей и пруды Хмелевой и Дворцовый (Большой Александрийский); 23. Красный пруд; 24. Квадратные пруды; 25. Английский пруд; 26. Черный пруд; 27. Троицкий ручей; 28. Р. Кристателька и пруды парка «Сергиевка».

К иным схемам отбора проб относятся: р. Шингарка – ГХА: все 5 сезонов, ИА: зима, весна, лето; Старопетергофский канал – ГХА: лето, ИА: лето; Ольгинский канал – ГХА: лето, зима 2026, ИА: лето; р. Кристателька – ГХА: весна, лето, ИА: весна, лето; Александринский ручей – ГХА: весна, лето, осень, зима 2026, ИА: весна, лето.

The numbers on the scheme indicate: 1. Levalovsky Stream; 2. Maly Zaborodsky Stream; 3. Bolshoy Zaborodsky Stream; 4. Fabrichnaya Rechka River; 5. Glyadinsky Stream; 6. Khabansky Stream; 7. Shingarka River; 8. Novopeterhofsky Canal; 9. Staropeterhofsky Canal; 10. Shinkarsky Pond; 11. Tserkovny (Church) Pond; 12. Babigonsky Pond; 13. Ruinny and Sapyorny Ponds; 14. Verkhny and Nizhny Orlinye (Upper and Lower Eagle) Ponds; 15. Melnichny (Mill) Pond; 16. Zapasny (Reserve) Pond; 17. Krugly (Round) Pond; 18. Olginsky Canal and Samsonievsky Water Conduit; 19. Nikolsky Pond; 20. Olginsky Pond; 21. Proletarsky Pond; 22. Alexandrinsky Stream and Khmelevoy and Dvortsovy Ponds; 23. Krasny (Red) Pond; 24. Kvadratnye (Square) Ponds; 25. Angliysky (English) Pond; 26. Cherny (Black) Pond; 27. Troitsky Stream; 28. Kristatelka River and ponds of Sergiyevka Park.

Other sampling schemes include: Shingarka River – HCA(Hydrochemical Analysis): all 5 seasons, IA(Isotopic Analysis): winter, spring, summer; Staropeterhofsky Canal – HCA: summer, IA: summer; Olginsky Canal – HCA: summer, winter 2026, IA: summer; Kristatelka River – HCA: spring, summer, IA: spring, summer; Alexandrinsky Stream – HCA: spring, summer, autumn, winter 2026, IA: spring, summer.

Для оценки гидрофизических и гидрохимических характеристик водных объектов ВПСФ был выполнен комплекс полевых и лабораторных исследований. Отбор проб воды для изотопного анализа, определения минерализации и pH, а также визуальные наблюдения за состоянием водотоков и водоемов проводились: в период зимней межени (февраль 2025 г. и январь 2026 г.), половодья (март – апрель 2025 г.), летне-осенней межени (июль и сентябрь 2025 г.).

Количество обследованных водных объектов варьировалось в зависимости от сезона: 8 водотоков в первую зимнюю съемку (родниковые ручьи Ропшинской возвышенности); в весенний период к ним добавились пруды Английского парка, парков «Сергиевка» и «Александрия», а также Александринский ручей; летом количество объектов увеличилось до 24 за счет включения Ольгинского и Старопетергофского каналов, Шинкарского, Черного и Пролетарского прудов; осенью основное внимание было уделено системе р. Шингарки и связанным с ней прудам-накопителям (Церковный, Бабигонский, Руинный, Орлиный, Никольский). Отбор проб воды выполнялся из поверхностного слоя в прибрежной части водных объектов в соответствии с общепринятыми методиками[1] [7], одновременно измерялась температура воды поверхностного слоя с помощью цифрового термометра RGK CT-105. Кроме того, на части водотоков (ручьях Ропшинской возвышенности, Ольгинском и Старопетергофском каналах, Александринском ручье, р. Шингарке, р. Кристателькe и Троицком ручье) водомерной рейкой ГР-104 измерялась мощность донных отложений.

Анализ изотопного состава выполнен в Лаборатории изменений климата и окружающей среды Арктического и антарктического научно-исследователь-

1 ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. Введ. 01.01.2023.

ского института (г. Санкт-Петербург). Измерения проводились на лазерном анализаторе Picarro L2130-i, реализующем технологию кольцевой спектроскопии (WS-CRDS – Wavelength-Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy). Подготовка проб и калибровка результатов выполнены сотрудниками лаборатории. Минерализация (TDS – Total Dissolved Solids) определялась кондуктометром HANNA HI 98311 Dist5; водородный показатель (pH) – pH-метром HANNA instruments HI98108; органолептические свойства – путем визуальной оценки цветности, наличия осадка и субъективной оценки запаха. Пространственная привязка всех точек отбора проб и промерных створов выполнялась с использованием GPS-навигатора GARMIN GPSMap 78s.

Для интерпретации полученных данных и составления сравнительной характеристики был использован метод относительных коэффициентов. В качестве эталона на каждую дату съемки приняты показатели Хабанского ручья, сток которого почти полностью обеспечен подземными водами, что позволяет рассматривать его как фоновую характеристику в разные сезоны родникового стока с Ижорской возвышенности (значения его показателей приняты за $K = 1$). Коэффициент рассчитан как отношение значения в исследуемом водном объекте к значению эталонного. Такой подход позволяет учесть сезонные колебания абсолютных величин исследуемых характеристик и выявить происходящие ниже родников изменения, обусловленные антропогенным влиянием, замедленным водообменом в прудах и поступлением поверхностного стока с предглинтовой низменности.

Поскольку термический и водный режимы водных объектов зависят от метеорологических условий, для корректной интерпретации результатов выполнен анализ данных о температуре воздуха и осадках по метеостанции «Санкт-Петербург» (26063)[2,3]. Учтены сведения за предшествующий период (ноябрь –

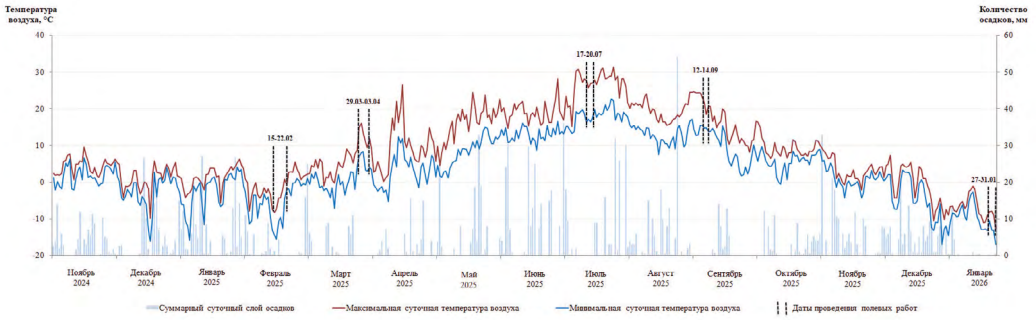


Рис. 2. Изменение метеорологических величин (ноябрь 2024 г. – январь 2026 г.) по данным метеостанции «Санкт-Петербург» (26063)

Fig.2. Changes in meteorological variables (November 2024 – January 2026) according to data from the St. Petersburg weather station (26063)

2 Архив погоды метеостанции «Санкт-Петербург» (26063). Режим доступа: https://rp5.ru (дата обращения: 10.03.2026).

3 ВНИИГМИ-МЦД. Режим доступа: http://meteo.ru/ (дата обращения: 18.12.2025).

декабрь 2024 г.) и за время проведения полевых работ, а также использованы официальные материалы Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)[4]. Метеорологические условия в период полевых работ в целом для Северо-Западного федерального округа характеризовались устойчивым превышением среднемесячных температур над климатической нормой и повышенной водностью года. Годовая сумма осадков составила 109 % от нормы (608 мм), а расчетная обеспеченность года по осадкам для периода наблюдений (1960–2025 гг., n = 65) составила 20 %, что соответствует условиям многоводного года. При этом в период проведения полевых работ осадки практически отсутствовали (менее 0,6 мм) (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате визуального обследования выявлено существенное влияние антропогенной деятельности на водные объекты. Русла водотоков на отдельных участках значительно засорены древесными остатками (Большой Забородский ручей), бытовыми и строительными отходами (р. Кристателька в районе ж/д моста у ст. Университет), зафиксированы желтоватый оттенок воды и устойчивый органический запах с нефтепродуктовой составляющей (Троицкий ручей и р. Шингарка, протекающие в черте Петергофа). На отдельных водотоках (Хабанском, Леваловском, а также Малом Забородском ручьях) выявлены участки русла, где в летний период населением осуществлялся забор воды (установлены насосы).

В теплый период года отмечено зарастание до 70–90 % северных частей акваторий Пролетарского, Черного и Английского прудов высшей водной растительностью (рогозом, тростником и рдестом). В Саперном пруду в результате дноуглубительных работ наблюдалось помутнение воды и снижение уровня. Гидротехнические сооружения (шлюзы, переливы, трубы) в Александрийском парке и парке «Сергиевка» находились в неудовлетворительном состоянии: они заилены, заросли, а в ряде случаев полностью бездействуют, нарушая водообмен. Берега многих водоемов в парковых зонах активно использовались для неорганизованного отдыха, что приводило к локальным скоплениям бытовых отходов.

Сезонная динамика гидрофизических, гидрохимических, изотопных характеристик воды

Гидрохимический и термический режим водоподводящей системы Петергофа формируется под действием двух групп факторов. С одной стороны, это питание водотоков из трещиноватых горизонтов ордовикского водоносного комплекса, дренирующих карбонатную толщу и задающих базовый уровень минерализации и pH. С другой – влияние сезонных и антропогенных факто-

4 Гидрометцентр России. Обзор погодных условий на территории Российской Федерации в 2025 году. М., 2026. Режим доступа: https://www.meteorf.gov.ru/press/news/42993/ (дата обращения: 03.03.2026).

ров, изменяющихся по мере движения водных потоков от Ижорской возвышенности к Финскому заливу через каскады прудов и каналов. Условно гидросеть была разделена на 4 участка: I. От верховий до Английского пруда; II. От Ольгинского канала до парка «Александрия»; III. Троицкий ручей – Черный пруд; IV. Р. Кристателька – пруды парка «Сергиевка».

I. От верховий до Английского пруда

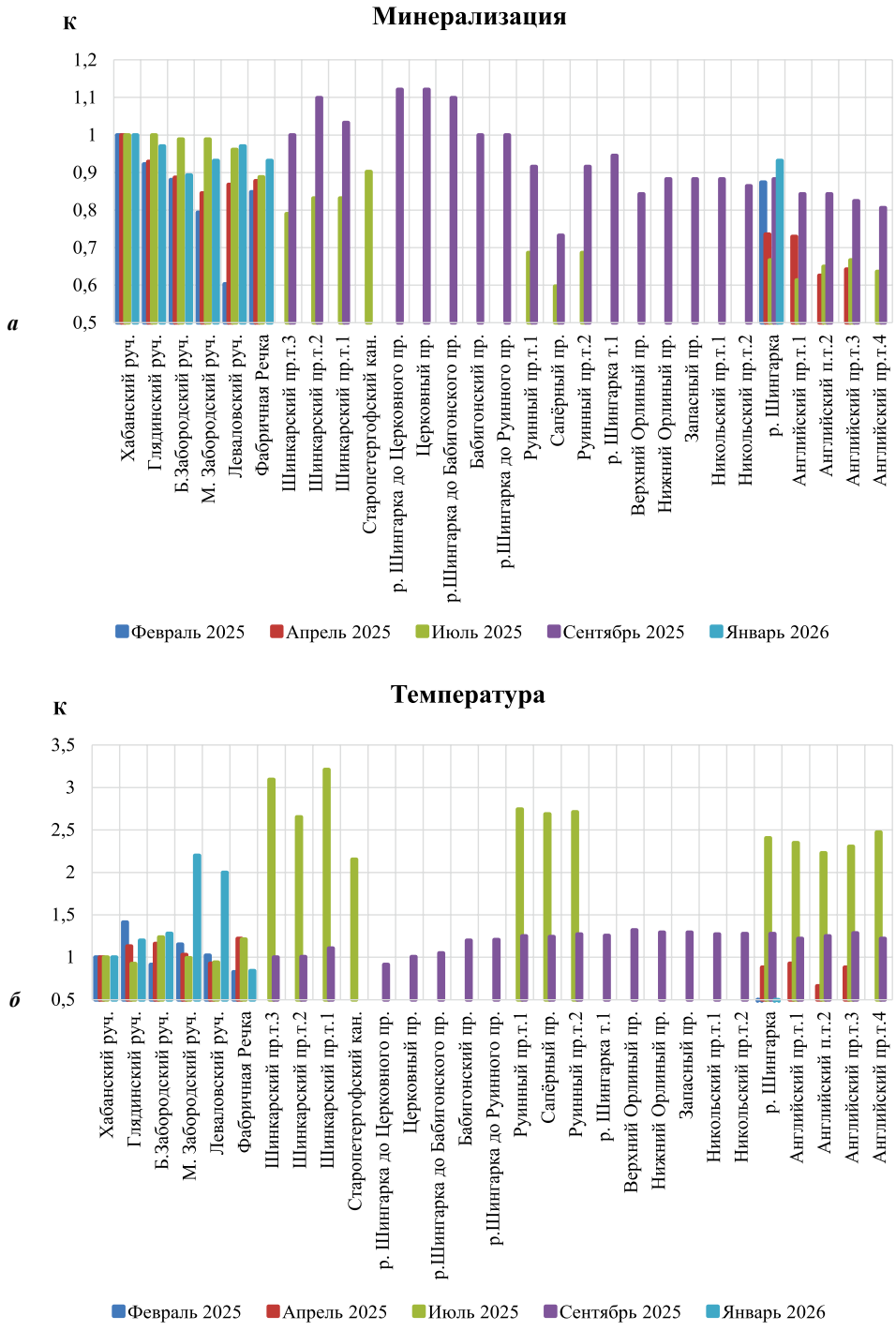
В первый участок объединены верховые ручьи, Старопетергофский канал, каскад прудов Лугового парка (Церковный, Бабигонский, Руинный, Саперный, Орлиные, Никольский) и замыкающий Английский пруд. Температура воды в водных объектах в зимний период составляла +4…+6 °С, летом изменялась в пределах +11…+14°С. Изотопный состав характеризовался значениями $\delta^{18}O$ от −11,85 до −11,99 ‰, d-excess 9,75–10,40. Минерализация сохранялась в интервале 317–357 мг/л. Относительные коэффициенты минерализации близки к 1 (рис. 3*а*). Исключение составил Леваловский ручей – 187 мг/л зимой 2025 г.

В Шинкарском пруду летом вода прогревалась до +37,9 °С (K = 3,21, рис. 3*б*), минерализация снижалась до 282–297 мг/л (K = 0,79–0,83). Далее по каскаду Лугового парка (осенние данные) температура повышалась от верховьев к устью (с +12,8 до +18,5 °С), а минерализация снижалась с 306 до 230 мг/л. Изотопный состав воды в прудах каскада утяжелялся по мере продвижения к устью: от $\delta^{18}O \approx -11{,}4$ ‰, d-excess ≈ 8,2–9,0 в Шинкарском пруду до максимального в Саперном пруду ($\delta^{18}O = -3{,}93$ ‰, d-excess = −14,26). В замыкающем Английском пруду – $\delta^{18}O \approx -10{,}0\ldots-10{,}4$ ‰, d-excess ≈ 5,2–6,1). В Саперном пруду летом минерализация составляла 213 мг/л (K = 0,60). Английский пруд сохранял пониженную относительно эталона минерализацию (K = 0,61–0,67) и высокую летнюю температуру (K = 2,2–2,5).

II. От Ольгинского канала до парка «Александрия»

Второй участок включает Ольгинский канал, а также водные объекты парка «Александрия» (Хмелевой и Дворцовый пруды), питающиеся от Александринского ручья. Ольгинский канал летом прогревался до +23,9 °С (K = 2,03, рис. 4*б*) при минерализации 317 мг/л (K = 0,89, рис. 4*а*), а зимой 2026 г. минерализация составляла 341 мг/л (K = 1,01). Изотопный состав канала – $\delta^{18}O \approx -11{,}70$‰, d-excess ≈ 9,4.

В точке 1 Пролетарского пруда, расположенной вблизи места врезки подземной трубы, соединявшей ранее канал с прудом, летняя минерализация составляла 187 мг/л (K = 0,52), изотопный состав – $\delta^{18}O$ до −6,62 ‰, d-excess до −8,01. В точке 5 Пролетарского пруда, наиболее близкой к границе двух парков, летняя минерализация – 116 мг/л (K = 0,32), $\delta^{18}O = -7{,}10$ ‰, d-excess = −5,22. В Александрийских прудах минерализация составляла 255–256 мг/л, $\delta^{18}O \approx -11{,}0\ldots-11{,}2$ ‰, d-excess ≈ 7–8.



а

б

Рис. 3. Изменение минерализации (*а*) и температуры (*б*) воды от родников до Английского пруда относительно измеренных в Хабанском ручье

Fig. 3. Changes in mineralization (*a*) and temperature (*b*) of water from the springs to the English Pond relative to the values measured in the Khabansky Stream

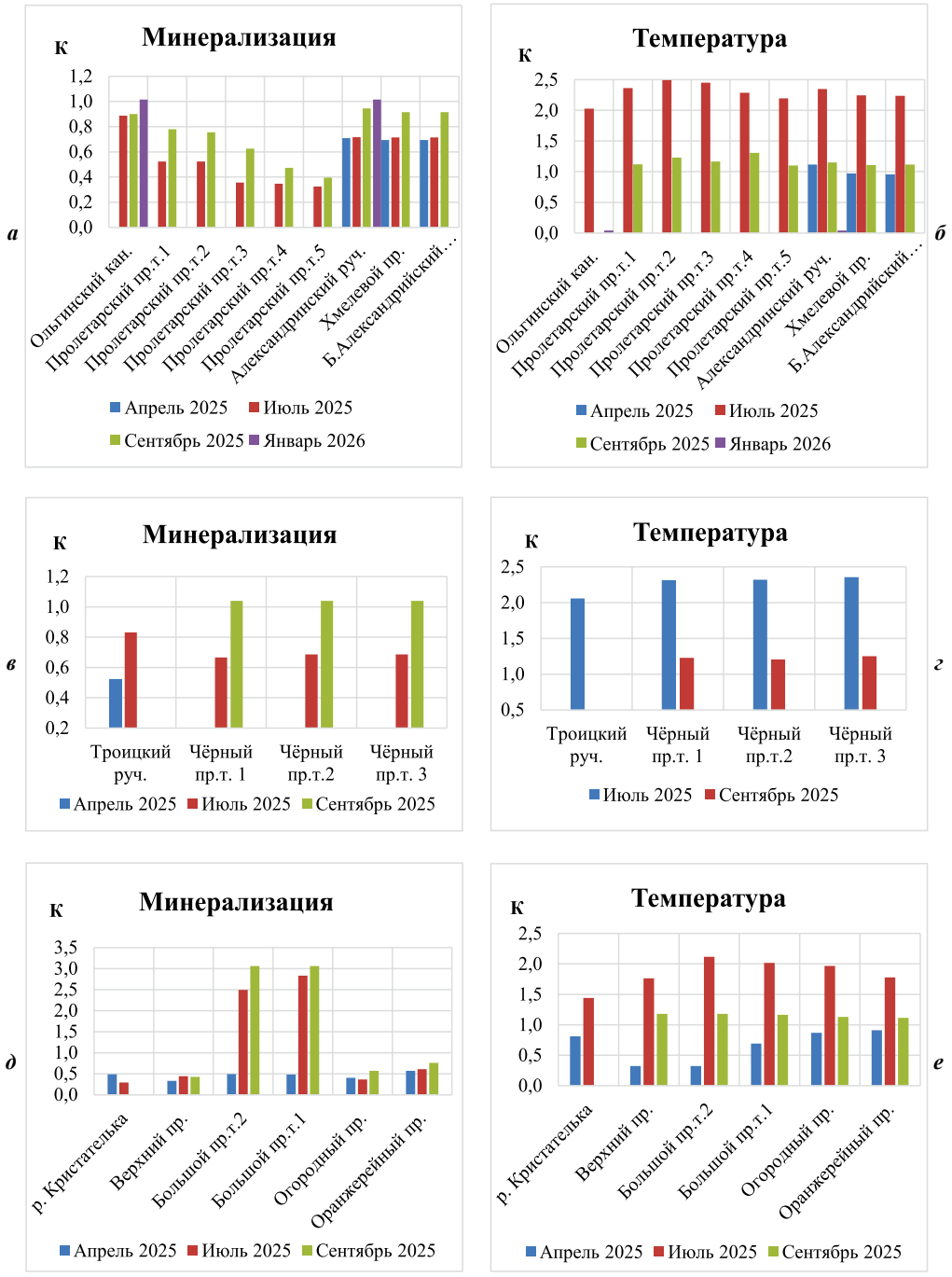


Рис. 4. Изменение минерализации и температуры воды относительно измеренных в Хабанском ручье: (*а, б*) – в водных объектах, связанных с Ольгинским каналом; (*в, г*) – в бассейне Троицкого ручья; (*д, е*) – в бассейне р. Кристателки

Fig. 4. Changes in water mineralization and temperature relative to the values measured in the Khabansky Stream: (*a, b*) – in water bodies associated with the Olginsky Canal; (*c, d*) – in the Troitsky Stream basin; (*e, f*) – in the Kristatelka River basin

Александринский ручей и связанные с ним Хмелевой и Дворцовый пруды характеризовались минерализацией с K = 0,71–0,72, температурой до +27,7 °C (K = 2,35), $\delta^{18}O \approx -11{,}2\ldots-11{,}0$ ‰, d-excess ≈ 8,0–7,8.

III. Троицкий ручей – Черный пруд

Третий участок представлен Троицким ручьем и Черным прудом, который в настоящее время гидравлически не связан с Английским прудом.

Для Троицкого ручья характерна сезонная изменчивость показателей. Зимой минерализация составляла 280–336 мг/л (K = 0,90–1,00), температура – около 0 °C, изотопный состав – $\delta^{18}O = -12{,}25$ ‰, d-excess = 8,82. Летом минерализация снижалась до 297 мг/л (K = 0,83, рис. 4*в*), температура повышалась до +24,3 °C (K = 2,06, рис. 4*г*), изотопный состав – $\delta^{18}O = -10{,}72$ ‰, d-excess = 7,04.

Черный пруд летом прогревался до +27,8 °C (K = 2,36), изотопный состав – $\delta^{18}O \approx -10{,}35$ ‰, d-excess ≈ 6,2. В теплый сезон pH снижался до 6,9–7,1. Осенняя минерализация возрастала до 284 мг/л (K = 0,92).

IV. Р. Кристателька – пруды парка «Сергиевка»

Четвертый участок включает р. Кристателька и каскад прудов парка «Сергиевка» (Верхний, Большой, Огородный, Оранжерейный).

Летняя минерализация Кристателька составляла 105 мг/л (K = 0,29, рис. 4*д*), $\delta^{18}O = -9{,}67$ ‰, d-excess = 3,3. Минерализация в прудах парка «Сергиевка» в тот же период варьировалась от 130 до 219 мг/л (Верхний – 159, Огородный – 130, Оранжерейный – 219). В Большом пруду зафиксирована минерализация до 1012 мг/л (K = 2,83) при pH 6,7–6,8.

В сентябре минерализация Большого пруда снизилась до 836 мг/л, в остальных прудах каскада значения не превышали 156–208 мг/л. К концу ноября 2025 г. минерализация составила: Большой – 36–109 мг/л, Огородный – 55 мг/л, Верхний – 65 мг/л, Оранжерейный – 99 мг/л, а pH сместился в кислую область (6,3–6,6). Река Кристателька в этот период имела минерализацию 165 мг/л.

Выводы о причинах выявленных изменений характеристик воды

Полученные результаты пространственно-временного изменения гидрофизических характеристик и изотопного состава воды показали следующее. В холодный период года в водных объектах преобладают подземные воды, поверхностное питание незначительно, поэтому наблюдаемые характеристики воды мало различаются от истоков до устьевых участков гидрографической сети. Основные изменения происходят в летний период: последовательное прохождение воды через пруды усиливает ее нагревание, а снижение минерализации связано с осаждением солей и разбавлением талыми и до-

ждевыми водами с прилегающих территорий. На изменение характеристик воды оказывают влияние степень проточности прудов и урбанизация водосборов.

На слабопроточных прудах (Саперном, западной части Английского) летом возрастает питание дождевыми водами, что приводит к более высокому росту температуры, снижению минерализации и увеличению потерь на испарение по сравнению с проточными водоемами. Парадоксальное сочетание низкой минерализации с экстремальным изотопным сдвигом в Саперном пруду объясняется его слабой проточностью и питанием преимущественно с заболоченного водосбора; ранее пруд был более проточным и соединен двумя каналами с Черным прудом. На непроточном в современных условиях Пролетарском пруду дополнительным фактором, влияющим на солевой баланс, является активное зарастание акватории высшей водной растительностью (до 70–90 %). Отсутствие гидравлической связи Пролетарского пруда с Ольгинским каналом подтверждается различиями минерализации (116–187 мг/л против 317 мг/л) и изотопного состава ($\delta^{18}O$ до −6,6 ‰ против −11,7 ‰).

Наибольшее влияние урбанизации на формирование гидрологического режима выявлено у Троицкого ручья и гидравлически связанного с ним Черного пруда, а также у прудов парка «Сергиевка». Водосбор Троицкого ручья в XX в. застроен более чем на 2/3, а водосбор прудов «Сергиевки» сокращен почти в 10 раз. В результате на этих объектах зафиксированы высокий летний прогрев воды и низкая минерализация даже зимой. Сезонная динамика Троицкого ручья отражает смешанный тип питания: зимой доминируют подземные воды, летом добавляются поверхностные (талые и дождевые), которые снижают минерализацию и утяжеляют изотопный состав. Черный пруд выступает как локальный аккумулятор тепла и зона трансформации гидрохимических характеристик, однако его изолированность от нижележащих звеньев системы ограничивает влияние на магистральный поток.

Система р. Кристательки и прудов парка «Сергиевка» функционирует обособленно. Хроническое нарушение водосбора (низкая минерализация и тяжелый изотопный состав) сохраняется круглый год. Летняя аномалия минерализации в Большом пруду (до 1012 мг/л) не является результатом многолетнего испарительного концентрирования, а представляет собой локальный антропогенный эпизод. Наиболее вероятными причинами являются неорганизованный сброс сточных или дренажных вод с прилегающей территории либо вторичное загрязнение от ранее загрязненных донных отложений, поступавших со стоком р. Кристательки в период активной застройки ее водосбора. Прямых доказательств сброса не выявлено. Изменение гидрохимических показателей в предледоставный период свидетельствует о способности системы к сезонному снижению минерализации под влиянием природных факторов.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования выявили существенное изменение гидрофизических и гидрохимических характеристик воды в гидросистемах ГМЗ «Петергоф» и в ООПТ «Памятник природы «Парк «Сергиевка», которые нарастают от основной зоны питания из родников с Ижорской возвышенности к побережью Финского залива. Особенности этих изменений состоят в следующем.

Наибольшие изменения гидрофизических характеристик по длине гидросистемы ГМЗ наблюдаются в летний период. Начиная от Шинкарского пруда, температура воды летом вырастает почти в три, а осенью – в 1,5 раза по отношению к температуре воды в родниках. Минерализация начинает снижаться от Шингарского пруда и в Английском она уже ниже более чем на 1/3. В зимний период эти характеристики меняются по длине незначительно.

Изменение минерализации в водных объектах, связанных с Ольгинским каналом, показывает, что в питании Пролетарского пруда воды Шингарской системы играют очень малую роль и он слабопроточный. Хмелевой и Дворцовый (Большой Александрийский) пруды сохранили питание от родников.

В питании Троицкого ручья роль родникового стока мала, т. к. он вытекает из заболоченной предглинтовой территории. Высокая минерализация в нем обусловлена высокой степенью урбанизации водосбора.

Основная река, питающая пруды парка «Сергиевка», в современных условиях не получает подземное питание от родников Ижорской возвышенности. Ее сток формируется преимущественно из осадков на водосбор. Существенный рост минерализации летом в Большом пруду, вероятно, связан с локальным антропогенным воздействием – неорганизованным сбросом сточных или дренажных вод с прилегающей территории либо вторичным загрязнением от ранее загрязненных донных отложений. Прямых доказательств сброса не выявлено.

Наибольшее антропогенное влияние на гидрохимические характеристики выявлено в Черном и Большом прудах. Слабая проточность оказывает влияние на наблюдаемые показатели на Саперном и Пролетарском прудах.

Для устойчивой эксплуатации гидросистемы ГМЗ «Петергоф» и сохранения ООПТ «Памятник природы «Парк «Сергиевка» необходимы:

а) восстановление проточности Саперного и Пролетарского прудов и гидравлической связи Пролетарского пруда с Ольгинским каналом;

б) санация водосборов Троицкого ручья, Черного и Большого прудов со снижением поступления загрязнений;

в) регулярный мониторинг изотопного состава и минерализации воды в контрольных точках;

г) ограничение неорганизованного сброса сточных и дренажных вод с прилегающих урбанизированных территорий.

В перспективе планируется дальнейшая застройка водосборной площади ВПСФ, что может усилить выявленные негативные тенденции (как это уже произошло на примере Троицкого ручья, Черного, Пролетарского и Большого прудов). Это указывает на чрезвычайную актуальность скорейшей разработки мероприятий по сохранению и улучшению состояния водных объектов дворцово-парковых ансамблей в Петергофе. Для более точной оценки влияния урбанизированной части водосбора необходимы дальнейшие исследования с расширением перечня измеряемых показателей.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Памятники архитектуры пригородов Ленинграда. Л.: Стройиздат, 1985. С. 120–135. Режим доступа: https://djvu.online/file/opgHrBICN0xQ0 (дата обращения: 20.03.2026).
2. Архипов Н. И. Исследования по истории Петергофа: сборник трудов. СПб.: ГМЗ «Петергоф», 2016. С. 592. ISBN 978-5-91598-022-7. Режим доступа: https://peterhofmuseum.ru/assets/files/20170904/d31f3f8b1f758a51bf5a5c633e53da57.pdf (дата обращения: 20.03.2026).
3. Потравнов А. Л. Петергофская водоподводящая система: 300 лет истории / А. Л. Потравнов, Т. Ю. Хмельник. СПб., 2019.
4. Карпенко А. Г. Научно-практическая оценка возможности воздействия строительства и эксплуатации локальных малоэтажных зданий на Петергофскую водоподводящую систему фонтанов // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов (Санкт-Петербург, 12–16 апр. 2021 г.). Т. 4. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. С. 32–33. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47142132 (дата обращения: 23.03.2026).
5. Чайников Н. А. Ремонт берегоукрепления Сухого пруда – элемента водоподводящей системы Петергофа // Неделя науки ИСИ: сборник материалов Всероссийской конференции (Санкт-Петербург, 04-10 апр. 2022 г.). Ч. 1. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 72–75. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50111037 (дата обращения: 25.03.2026).
6. Яковлева Н. М. Эксплуатация гидротехнических сооружений водоподводящей системы фонтанов Петергофа // Окружающая среда Санкт-Петербурга, 2023. № 2. С. 26–30. Режим доступа: https://ecopeterburg.ru/2023/07/14/эксплуатация-гидротехнических-соор/ (дата обращения: 25.03.2026).
7. Titov K. Monitoring of water seepage from a reservoir using resistivity and self polarization methods: case history of the Petergoph fountain water supply system / K. Titov, V. Loukhmanov, A. Potapov // First Break. 2000. Vol. 18. Iss. 10. P. 431–435. Режим доступа: https://pureportal.spbu.ru/en/publications/monitoring-of-water-seepage-from-a-reservoir-using-resistivity-and-self-polarization-methods(575ba75c-d458-4d55-97cf-0ff1bf30e4cf).html (дата обращения: 20.03.2026).
8. Ромачевский В. М. Водоподводящая система Петергофских фонтанов – чудо русской гидротехники / В. М. Ромачевский, А. Н. Евдокимов, А. В. Зыков // История Петербурга. 2022. № 2 (86). С. 130–146. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48617427 (дата обращения: 20.04.2026).

9. Рябова В. Н. Восстановление растительности рекультивированных прудов западной ветви водоподводящей системы г. Петергофа / В. Н. Рябова, В. А. Васильева // Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биология. 2009. № 3. С. 146–157. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12915729 (дата обращения: 20.04.2026).
10. Старыгина А. Л. Современное состояние дворцово-паркового ансамбля «Сергиевка»: магистерская диссертация. СПб., 2015. Режим доступа: http://elib.spbstu.ru/dl/2/6020.pdf (дата обращения: 20.04.2026).
11. Румянцева Е. А. Современное состояние ручья Кристательки и прудов парка «Сергиевка». СПб. : Университет ИТМО, 2023. Режим доступа: https://kmu.itmo.ru/digests/article/11795 (дата обращения: 20.04.2026).
12. Алекин О. А., Семенов А. Д., Скопинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. С. 269.

REFERENCES

1. Architectural monuments of Leningrad suburbs. Leningrad: Stroyizdat, 1985. P. 120-135. URL: https://djvu.online/file/opgHrBICN0xQ0 (accessed: 20.03.2026). (In Russ.).
2. Arkhipov N. I. Studies on the history of Peterhof: collected works. St. Petersburg: Peterhof State Museum-Reserve, 2016. P. 592. ISBN 978-5-91598-022-7. URL: https://peterhofmuseum.ru/assets/files/20170904/d31f3f8b1f758a51bf5a5c633e53da57.pdf (accessed: 20.03.2026). (In Russ.).
3. Potravnov A. L., Khmelnik T. Yu. The Peterhof water supply system: 300 years of history. St. Petersburg, 2019. (In Russ.).
4. Karpenko A. G. Scientific and practical assessment of the possible impact of construction and operation of local low-rise buildings on the Peterhof fountain water supply system. In: Current problems of subsoil use. Proceedings of the XIX All-Russian Conference-Contest of Students and Postgraduates, St. Petersburg, April 12-16, 2021. Vol. 4. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University, 2021. P. 32-33. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47142132 (accessed: 23.03.2026). (In Russ.).
5. Chaynikov N. A. Repair of the bank protection of the Sukhoy Pond – an element of the Peterhof water supply system. In: Science Week of the Institute of Civil Engineering. Proceedings of the All-Russian Conference, St. Petersburg, April 04-10, 2022. Part 1. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. P. 72–75. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50111037 (accessed: 25.03.2026). (In Russ.).
6. Yakovleva N. M. Operation of hydraulic structures of the water supply system of the Peterhof fountains. *Environment of Saint Petersburg*. 2023. No. 2. P. 26–30. URL: https://ecopeterburg.ru/2023/07/14/эксплуатация-гидротехнических-соор/ (accessed: 25.03.2026). (In Russ.).
7. Titov K., Loukhmanov V., Potapov A. Monitoring of water seepage from a reservoir using resistivity and self polarization methods: case history of the Petergoph fountain water supply system. *First Break*. 2000. Vol. 18. Iss. 10. P. 431–435. URL: https://pureportal.spbu.ru/en/publications/monitoring-of-water-seepage-from-a-reservoir-using-resistivity-and-self-polarization-methods(575ba75c-d458-4d55-97cf-0ff1bf30e4cf).html (accessed: 20.03.2026).
8. Romachevsky V. M., Evdokimov A. N., Zykov A. V. The water supply system of the Peterhof fountains – a wonder of Russian hydraulic engineering. *History of Petersburg*. 2022. Iss. 2 (86). P. 130–146. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48617427 (accessed: 20.04.2026). (In Russ.).
9. Ryabova V. N., Vasilyeva V. A. Restoration of vegetation of reclaimed ponds of the western branch of the water supply system of Peterhof. *Vestnik SPbGU. Ser. 3. Biology*. 2009. Iss. 3. P. 146–157. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12915729 (accessed: 20.04.2026). (In Russ.).
10. Starygina A. L. Current state of the palace and park ensemble “Sergievka”: master’s thesis. St. Petersburg, 2015. URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/6020.pdf (accessed: 20.04.2026). (In Russ.).

11. Rumyantseva E. A. Current state of the Kristatelka stream and ponds of Sergiyevka Park. St. Petersburg: ITMO University, 2023. URL: https://kmu.itmo.ru/digests/article/11795 (accessed: 20.04.2026). (In Russ.).
12. Alekin O. A., Semyonov A. D., Skopintsev B. A. Guide to chemical analysis of surface waters. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. P. 269. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Горбунова Алёна Вячеславовна, корреспондирующий автор, студентка кафедры гидрологии суши, Санкт-Петербургский государственный университет, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 10-я линия В. О., 33; https://orcid.org/0009-0002-9457-4760; e-mail: Alyona.gorbunowa2015@Yandex.ru

Марков Михаил Леонидович, канд. геогр. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отдел гидрологических процессов, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Россия, Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., 23; https://orcid.org/0000-0002-6118-2704; e-mail: 2014mml@gmail.com

Пряхина Галина Валентиновна, канд. геогр. наук, доцент, зав. кафедрой гидрологии суши, Санкт-Петербургский государственныцй университет, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 10-я линия В. О., 33; https://orcid.org/0000-0003-3684-4638; e-mail: g.pryahina@spbu.ru

Козачек Анна Владимировна, канд. геогр. наук, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный университет, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 10-я линия В. О., 33; заместитель заведующего отделом географии полярных стран лаборатории изменений климата и окружающей среды, ФГБУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт», 199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38; https://orcid.org/0000-0002-9704-8064; e-mail: Kozachek@aari.ru

About the authors:

Alena V. Gorbunova, corresponding author, Student, Land Hydrology Department, St. Petersburg State University, 33, 10th Line V. O., 199178, St. Petersburg, Russia; https://orcid.org/0009-0002-9457-4760; e-mail: Alyona.gorbunowa2015@Yandex.ru

Mikhail L. Markov, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Leading Researcher, Department of Hydrological Processes, State Hydrological Institute, 23, 2nd Line V. O., 199053, St. Petersburg, Russia; https://orcid.org/0000-0002-6118-2704; e-mail: 2014mml@gmail.com

Galina V. Pryakhina, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Head of the Land Hydrology Department, St. Petersburg State University, 33, 10th Line V. O., 199178, St. Petersburg, Russia; https://orcid.org/0000-0003-3684-4638; e-mail: g.pryahina@spbu.ru

Anna V. Kozachek, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Lecturer, St. Petersburg State University, 33, 10th Line V. O., 199178, St. Petersburg, Russia; Deputy Head of the Department of Polar Countries Geography, Laboratory of Climate and Environmental Change, Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Bering St., 199397 St. Petersburg, Russia; https://orcid.org/0000-0002-9704-8064; e-mail: Kozachek@aari.ru

Поступила в редакцию / Received 17.06.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 02.10.2026.
Принята к публикации / Accepted 06.10.2026.

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 12.10.2026. Дата выхода в свет 05.11.2026.
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. 12.10.2026. Data of issue 05.11.2026
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