

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 3, 2024



РОСВОДРЕСУРСЫ

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



УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:
ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ»

РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ (ФГБУ РосНИИВХ)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Лепихин А.П., д-р геогр. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Пермь, Россия)

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Беляев С.Д., д-р геогр. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)

Болгов М.В., д-р техн. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)

Борисова Г.Г., д-р биол. 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)

Зиновьев А.Т., д-р техн. наук, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН (Барнаул, Россия)

Козлов Д.В. профессор, д-р техн. наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва, Россия)

Никифоров А.Ф., д-р хим. наук, профессор, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)

Румянцев В.А., д-р геогр. наук, академик РАН, профессор, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Селезнёв В.А., д-р техн. наук, профессор, Институт экологии Волжского бассейна РАН (Тольятти, Россия)

Федоров Ю.А. д-р геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)

Хафизов А.Р., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Уфа, Россия)

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, профессор, Институт озероведения РАН, (Санкт-Петербург, Россия)

Ясинский С.В., д-р геогр. наук, Институт географии РАН (Москва, Россия)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ

Габриелян Б.К., д-р биол. наук, профессор, Национальная академия наук Республики Армения (Ереван, Республика Армения)

Гюнтер Блешль, профессор, Институт гидротехники и управления водными ресурсами (Вена, Австрия)

Драган А. Савич, профессор, Центр водных систем Университета Эксетера (Эксетер, Великобритания)

Карло Гуальтери, профессор, Университет Неаполя им. Фридриха II (Неаполь, Италия)

Кью Джи Ванг, профессор, Университет Мельбурна (Мельбурн, Австралия)

Слободан П. Симонович, профессор, Университет Западного Онтарио (Онтарио, Канада)

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕДАКТОР

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 3, 2024

ЕКАТЕРИНБУРГ
YEKATERINBURG



EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

Anatoliy P. Lepikhin, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, Institute of Mining of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russia)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Sergey D. Belayev, Dr. Sc. (Geographical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)

Mikhail V. Bolgov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Water Problems Institute of Water Problems (Moscow, Russia)

Galina G. Borisova, Dr. Sc. (Biological), 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)

Aleksandr T. Zinoviyev, Dr. Sc. (Technical), Russian Academy of Sciences Siberian Branch Institute of Water and Environmental Problems (Barnaul, Russia)

Dmitriy V. Kozlov, Dr. Sc. (Technical), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

Aleksandr F. Nikiforov, Dr. Sc. (Chemical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

Vladislav A. Rumyantsev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Limnology, (St. Petersburg, Russia)

Vladimir A. Seleznyev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of the Volga Basin Ecology Laboratory for Water Bodies Monitoring (Togliatti, Russia)

Yuri A. Fedorov, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Southern Federal University (Rostov-na-Donu, Russia)

Airat R. Khafizov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ufa, Russia)

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), Professor, 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)

Q.J. 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 ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

Выбор периода гидрологического ряда наблюдений для разработки эффективных правил регулирования стока водохранилищем в условиях климатических и антропогенных изменений на водосборе <i>М.В. Болгов, А.Е. Косолапов, В.Б. Бубер, В.В. Ильинич, А.Л. Бубер</i>	5
Использование искусственных нейронных сетей для оценки поверхностного стока в расчетах водохозяйственного баланса бассейна реки Верхний Оронтеc <i>А. Слейман, Д.В. Козлов</i>	21
Потребность населения в воде: принципы нормоформирования <i>Л.И. Соколов, К.Л. Соколов</i>	38

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Основные тенденции изменения естественных и антропогенных факторов и геоэкологические последствия высыхания Аральского моря <i>А.М. Гареев, А.С. Неъматулло кизи, С.У. Уролов</i>	53
Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) <i>Ю.А. Федоров, Д.Н. Гарькуша, А.Е. Косолапов, Е.В. Усова, Е.Л. Анпилова М.А. Верецагин, А.И. Беляев</i>	68
Межгодовые изменения содержания органического вещества и биогенных элементов в водохранилищах Нижней Волги: влияние климатической трансформации <i>Е.А. Шашуловская, С.А. Мосияш</i>	83
Современные особенности ледового режима Нижнего Енисея <i>В.В. Зуев, В.А. Уйманова, А.В. Павлинский</i>	101

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Обоснование ферментно-кавитационной обработки осадка сточных вод <i>В.А. Домрачева, Д.В. Васильковская</i>	115
Требования к оформлению материалов.....	123

CONTENT

WATER RESOURCES MANAGEMENT

- A choice of hydrological observations series period for the development of effective rules for the reservoir control during climatic and anthropogenic changes in the catchment
M.V. Bolgov, A.E. Kosolapov, V.B. Buber, V.V. Ilinich, A.L. Buber.....5
- Using of artificial neural networks to estimate surface runoff on the water balance calculations of the Upper Orontes River basin
A. Slieman, D.V. Kozlov.....21
- The population's need for water: the principles of norm-formation
L.I. Sokolov, K.L. Sokolov.....38

WATER RESOURCES, WATER BODIES


- The main change trends in natural and anthropogenic factors responsible for the Aral Sea desiccation and its geo-ecological
A.M. Gareev, S.N. Azimova, S. U. Urolov.....53
- Artificial water bodies as methane genesis hotbeds (the Tsimlyansk reservoir as an example)
Y.A. Fedorov, D.N. Garkusha, A.E. Kosolapov, E.V. Usova, E.L. Anpilova, M.A. Vereshchagin, A.I. Belayev.....68
- Interannual changes in the content of organic matter and biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga: the influence of climatic transformation
E.A. Shashulovskaya, S.A. Mosiash.....83
- Modern characteristics of the ice regime of the Lower Yenisei
V.V. Zuev, V.A. Uymanova, A.V. Pavlinskiy.....101

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

- Rationale for enzymatic cavitation treatment of sewage sludge
V.A. Domracheva, D.V. Vasilkovskaya.....115
- Requirements to the material to be accepted.....123

Выбор периода гидрологического ряда наблюдений для разработки эффективных правил регулирования стока водохранилищем в условиях климатических и антропогенных изменений на водосборе

М.В. Болгов¹  , А.Е. Косолапов² , В.Б. Бубер³, В.В. Ильинич³,
А.Л. Бубер³

 bolgovmv@mail.ru

¹ Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

² Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия

³ Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Статья посвящена выявлению изменений режима речного стока под влиянием климатических и антропогенных изменений на водосборе Цимлянского водохранилища. Основная цель работы – объективный выбор расчетного периода из длительного временного ряда наблюдений для получения эффективных правил регулирования стока водохранилищем. **Методы.** Обоснован методический подход к выделению периода из длительного временного ряда наблюдений на основе статистических методов, используемых в гидрометеорологии. В рамках методического подхода для решения поставленных задач был выбран инструмент разностной интегральной кривой стока к ряду наблюдений с 1881 по 2022 гг. Проведена оценка основных статистических характеристик годового и сезонного стоков, квантилей их распределения и соответствующих статистических ошибок, полученных за разные периоды наблюдений. **Результаты.** На основании полученных численных значений для характеристик стока и факторов, влияющих на его режим, выбран репрезентативный период наблюдений за стоком, позволяющий разрабатывать достаточно объективные и эффективные правила управления:

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: речной сток, водосбор, водохранилище, регулирование стока, климатические изменения, антропогенные изменения, статистические расчеты.

Для цитирования: Болгов М.В., Косолапов А.Е., Бубер В.Б., Ильинич В.В., Бубер А.Л. Выбор периода гидрологического ряда наблюдений для разработки эффективных правил регулирования стока водохранилищем в условиях климатических и антропогенных изменений на водосборе // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 5–20. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-5-20.

Дата поступления 27.04.2024.

© Болгов М.В., Косолапов А.Е., Бубер В.Б., Ильинич В.В., Бубер А.Л., 2024

A CHOICE OF HYDROLOGICAL OBSERVATIONS SERIES PERIOD FOR THE DEVELOPMENT OF EFFECTIVE RULES FOR THE RESERVOIR CONTROL DURING CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC CHANGES IN THE CATCHMENT AREA

Mikhail V. Bolgov¹  , Aleksey E. Kosolapov² , Vladimir B. Buber³,
Vitaly V. Ilinich³, Alexander L. Buber³

 bolgovmv@mail.ru

¹*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Russian Information-Analytical and Scientific Research Water Management Center, Rostov-on-Don, Russia,*

³*A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Moscow, Russia*

ANNOTATION

Relevance. The article is devoted to the revealing of river runoff changes caused by climatic and anthropogenic changes at the Tsimlyansk reservoir catchment. The main objective of the work is to choose the designed period from the long series of observations in order to obtain effective rules for regulating the reservoir runoff. **Methods.** We have justified the methodical approach to identifying a period from a long-time series of observations based on statistical methods used in hydro/meteorology. Within the frames of methodological approach to solution of the preset problems, we have chosen a tool of difference integral curve of runoff applied to the observation series from 1881 to 2022. We have assessed the main statistical characteristics of annual and seasonal runoff, including quartiles of their distribution and corresponding statistical errors obtained for different observation periods. **Results.** Based on the obtained digital values for the runoff characteristics and factors that influence their regime, we have chosen a representative runoff observation period, which enables to develop sufficiently objective and effective management rules:

Keywords: river flow, watershed, reservoir, flow regulation, climate change, anthropogenic changes, statistical calculations.

For citation: Bolgov M.V., Kosolapov A.E., Buber V.B., Ilinich V.V., Buber A.L. A choice of hydrological observations series period for the development of effective rules for the reservoir control during climatic and anthropogenic changes in the catchment area. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 5–20. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-5-20.

Received 27.04.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Уже более полувека фиксируются значительные признаки потепления климата, которые выходят за рамки обычных колебаний температуры воздуха, водных объектов, почв и других объектов техносферы [1, 2], что не может не влиять на процессы формирования поверхностного и подземного стоков на водосборе. Изменение антропогенных характеристик речных бассейнов во времени не оспариваются, они также влияют на процессы формирования стока [3–5]. Одним из элементов техносферы, изменяющим естественный сток рек, является водохранилище, при этом оно само требует довольно строгой оценки происходящих на его водосборе изменений естественного стока [6].

Изменения во времени климатических характеристик, ландшафтов водосбора, степени использования его водных ресурсов в различных пунктах

речного бассейна из поверхностных и подземных источников и, в целом, характера антропогенной нагрузки обуславливают необходимость решения задачи о выборе хронологического периода наблюдений за стоком, что позволит получить достаточно объективные вероятностные характеристики регулирования речного стока, на которые опираются правила использования водных ресурсов водохранилища (ПИВР). В большинстве случаев при проведении водохозяйственных расчетов для различных типов водохранилищ и согласно российским требованиям выполнения расчетов по актуализации ПИВР¹ необходимы численные значения располагаемых водных ресурсов для расчетных обеспеченностей (P, %): 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 %, 95 %, которые должны определяться согласно². Следует особо отметить, что правила трансформации катастрофических половодий и паводков регламентируются особыми разделами документа. Относительно перечисленных обеспеченностей определяются контролируемые элементы водохозяйственных балансов, такие как плановая и реальная водоотдача водопользователям, характерные объемы и уровни водохранилища и др. Соответственно, именно для этих обеспеченностей необходимо иметь реальные и точные значения годовых и сезонных величин стока в современных условиях его формирования, что требует объективного выбора продолжительности ряда наблюдений.

Следует отметить, что два действующих российских инструктивных документа^{1,3} имеют в этом плане противоречия. В первом требования сводятся к выбору наиболее длинного ряда – не менее 40 лет – для моделирования функционирования водохранилища, во втором рекомендован ряд с 1991 по 2020 гг., как наиболее адекватно отражающий климатические изменения последних десятилетий.

Одним из наиболее подверженных климатическим изменениям и антропогенным нагрузкам можно считать водные ресурсы бассейна р. Дон [3, 4, 7] и, в частности, водосбора Цимлянского водохранилища. Соответственно, основной целью представленной работы является выбор периода наблюдений из длительного временного ряда данных для получения объективных и эффективных правил регулирования стока водохранилищем. Решались следующие основные задачи:

- обоснование методического подхода к выделению периода из длительного временного ряда наблюдений на основе статистических методов, используемых в гидрометеорологии;

- выявление характерных периодов по наблюдаемым значениям годового и сезонного стоков по их тенденциям во времени;

- оценка основных статистических характеристик годового и сезонного стоков, квантилей распределения и их статистических ошибок, полученных за разные периоды наблюдений;

¹ Методические указания по разработке правил использования водохранилищ», утверждены приказом МПР РФ от 26.01.2011 г. № 17 (зарег. в Минюсте РФ 04.05.2011 г. № 20655)

² СП 529.1325800.2023. Определение основных расчётных гидрологических характеристик, Москва, 2023, С. 103.

³ Приказ Росгидромета от 18.02.2022г № 64 «О внедрении актуализированных климатических норм в оперативно-производственную практику подведомственных учреждений Росгидромета».

– выбор репрезентативного периода из серии наблюдений за величинами речного стока для получения объективных и эффективных правил управления водохранилищем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходными данными для исследований послужили многолетние наблюдения за стоком р. Дон относительно створа Цимлянского водохранилища, представленные годовыми объемами (W_i [млн м³], i – годы). Гидрологический ряд был переформирован относительно начала водохозяйственного года (III месяц), принятого согласно балансовым соотношениям между стоком и плановой водоотдачей при проектировании водохранилища. В рамках ряда наблюдений выделены внутригодовые интервалы половодья (III–V месяцы), летне-осенней межени (ЛОМ: VI–IX месяцы) и зимней межени (ЗМ: XII–II месяцы). Их хронологические значения в виде объемов стока за выделенные сезоны и в целом годовые представлены на рис. 1.

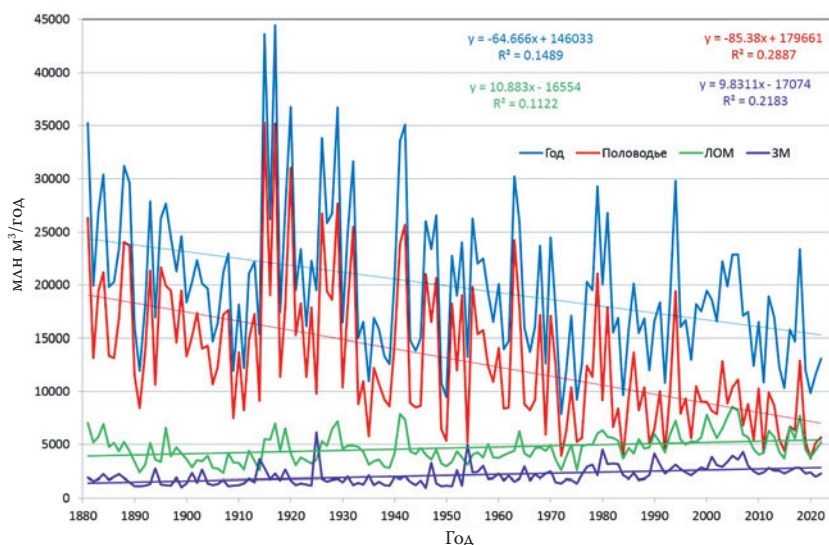


Рис. 1. Гидрографы объемов стока в период 1881–2022 гг.: годовых, за половодья, летне-осеннюю межень (ЛОМ), зимнюю межень (ЗМ).

Fig.1. Hydrographs of runoff volumes in the period 1881-2022: annual, for floods, for summer-autumn low-water (LOM), for winter low-water (WL).

Из совокупности графически представленных хронологических рядов и их линейных трендов нетрудно сделать заключение об общем уменьшении стока за годовые интервалы и половодья и об увеличении стока зимней и летне-осенней межени.

Для оценки различий тенденций хронологических значений стока в рамках всего периода наблюдений в мировой практике использовались различные подходы [8–13 и др.]. Как правило, тенденции выявлялись путем расчета наклона линии Тейла–Сена [14], при этом теоретической основой был математически обоснованный метод Манна-Кэндала [15], в котором для получения

оценки качества трендов ряда из чисел W_i применяется количественная оценка следующих после каждого хронологически наблюдаемого значения – значений меньших, чем само рассматриваемое хронологическое значение W_i .

В целом можно заключить, что на территории Европы в северных регионах чаще преобладает небольшая положительная динамика годового стока, а в средних и южных широтах Европы – снижение годовых объемов речного стока началось в 1965 г., а с начала 1980-х годов объемы постоянно были ниже среднего показателя за 1950–2013 гг. Также отмечено, что динамика годового объема речного стока, по-видимому, согласуется с данными метеорологических наблюдений континентального масштаба в ответ на факторы изменения климата. [12].

В настоящем исследовании выбран инструмент разностной интегральной кривой стока [16, 17 и др.] для выделения трендов, ординатами которых (R_i) в данном варианте являются ежегодно накапливающиеся разности ($K_i - I$), где K_i – модульный коэффициент ($K_i = W_i / W_0$, где i – годы наблюдаемого ряда, а W_0 – средняя многолетняя величина по всему ряду W). Такой подход позволяет выявить периоды с различными тенденциями стока относительно его средней многолетней величины (рис. 2).

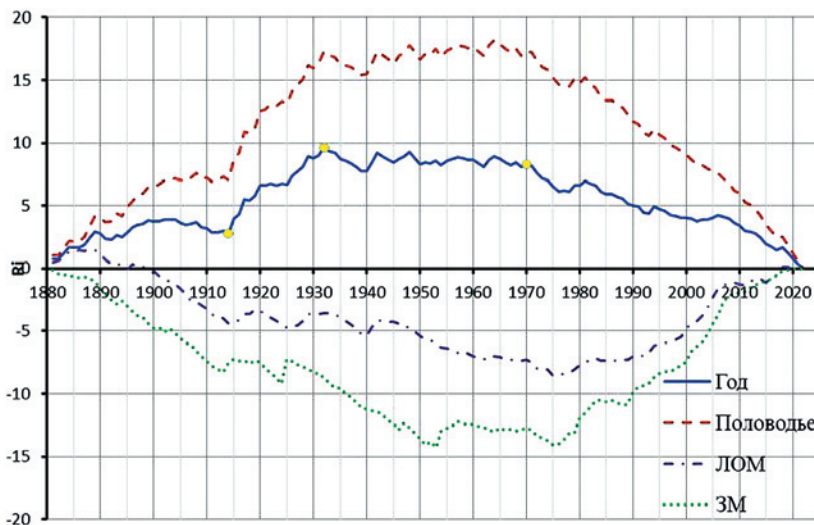


Рис. 2. Разностные интегральные кривые стока для годовых значений, половодья, летне-осенней межени (ЛОМ) и зимней межени (ЗМ).

Fig.2. Difference integral runoff curves for annual values, high water, summer-autumn low water (LOM) and winter low water (WL).

Исходя из данных рис. 2, можно выявить многоводные периоды (кривая поднимается), соответствующие малым колебаниям относительно средне-многолетнего значения (примерно горизонтальная линия) и маловодные (кривая понижается). В целом, анализ тенденций разностных интегральных кривых стока р. Дон в створе Цимлянского водохранилища дает основания выделить следующие характерные периоды.

Для годовых значений:

1881–1932 гг. – многоводный период, поскольку кривая в целом имеет достаточно выраженный подъем, т. е. годовые значения преимущественно выше среднемноголетнего, этот период можно назвать условно многоводным;

1933–1970 гг. – примерно средний по водности период;

1971–2022 гг. – маловодный период, поскольку наклон кривой идет вниз.

Для половодья:

1881–1932 гг. – период с большими половодьями;

1933–1964 гг. – период примерно средних по водности половодий;

1965–2022 гг. – период половодий ниже их среднего объема.

Для летне-осенней межени:

1881–1974 гг. – период летне-осенней межени ниже их среднего объема;

1975–2022 гг. – период летне-осенней межени выше их среднего объема.

Для зимней межени:

1881–1951 гг. – период зимней межени ниже их среднего объема;

1952–1974 гг. – период примерно средних по водности объемов зимней межени;

1975–2022 гг. – период зимней межени выше их среднего объема.

Для каждого ряда годовых и сезонных величин стока из выше выделенных рядов наблюдений последних десятилетий и всего ряда наблюдений, а также для ряда с рекомендованной инструктивным письмом Росгидромета продолжительностью (1991–2020 гг.)³ были определены традиционные статистические характеристики: среднее (W_o), коэффициенты вариации и асимметрии. Их оценки получены как методом моментов (C_v , C_s , C_s/C_v), так и методом приближенного наибольшего правдоподобия (C_v^* , C_s/C_v^*) согласно² [18], исходя из априори принятой гипотезы, что численные величины стока каждого выделенного ряда наблюдений соответствуют трехпараметрическому закону гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. В таблицах (1–4) также приведена как наиболее строго определенная величина среднеквадратических ошибок ($\sigma_{1881-2022}$) по ряду в 142 года: для нормы стока (W_o) – согласно² и для C_v , C_s [19].

Таблица 1. Статистические параметры рядов наблюдений за годовым стоком
Table 1. Statistical parameters of the observation series over the annual runoff

Год	1881–2022	1881–1932	1933–1970	1971–2022	1991–2020	$\sigma_{1881-2022}$
Число лет	142	52	38	63	30	142
W_o , млн м ³	19 837	23 507	19 158	16 668	17 021	578
C_v	0,35	0,31	0,32	0,29	0,27	0,02
C_v^*	0,35	0,31	0,34	0,29	0,27	0,02
C_s	0,95	0,91	0,79	0,62	0,89	0,29
C_s/C_v	2,71	2,9	2,44	2,13	3,37	х
C_s/C_v^*	3	3	3	2,5	2,5	х

Таблица 2. Статистические параметры рядов наблюдений за стоком половодья
Table 2. Statistical parameters of the observation series over the high-water period runoff

Год	1881–2022	1965–2022	1991–2020	$\sigma_{1881-2022}$
Число лет	142	58	30	142
Среднее	13 042	8 950	8 446	547
C_v	0,5	0,44	0,39	0,05
C_v^*	0,5	0,44	0,4	0,05
C_s	0,968	1,17	1,19	0,4
C_s/C_v	1,93	2,67	3,09	x
C_s/C_v^*	3	3	3	x

Таблица 3. Статистические параметры рядов наблюдений за стоком лета-осени
Table 3. Statistical parameters of the observation series over the summer-fall runoff

Год	1881–2022	1975–2022	1991–2020	$\sigma_{1881-2022}$
Число лет	142	48	30	142
Среднее	4 684	5 470	5 766	114
C_v	0,29	0,23	0,23	0,02
C_v^*	0,29	0,23	0,23	0,02
C_s	0,644	0,459	0,415	0,29
C_s/C_v	2,26	2,01	1,79	x
C_s/C_v^*	3	2	2	x

Таблица 4. Статистические параметры рядов наблюдений за стоком зимы
Table 4. Statistical parameters of the observation series over the winter runoff

Год	1881–2022	1975–2022	1991–2020	$\sigma_{1881-2022}$
Число лет	142	48	30	142
Среднее	2 111	2 715	2 810	73
C_v	0,41	0,25	0,19	0,045
C_v^*	0,41	0,25	0,19	0,045
C_s	1,45	0,77	1,2	0,52
C_s/C_v	3,54	3,07	6,17	x
C_s/C_v^*	4	3	6	x

Из полученных таким образом статистических характеристик выбирали экспертным образом окончательно принятые значения среднего коэффициента вариации и соотношения между коэффициентами асимметрии и вариации, согласно которым строили аналитические кривые обеспеченности.

Кроме вышеперечисленных операций по многолетним суточным данным метеостанции г. Воронежа, находящейся примерно в зоне центра тяжести водосбора, для косвенной оценки влияния зимних оттепелей на водность зимней межени были проанализированы длительность годовых периодов с отрицательными температурами, а также количество и длительность глубоких оттепелей с повышением температур зимой выше 2,5 °С. При таких оттепелях

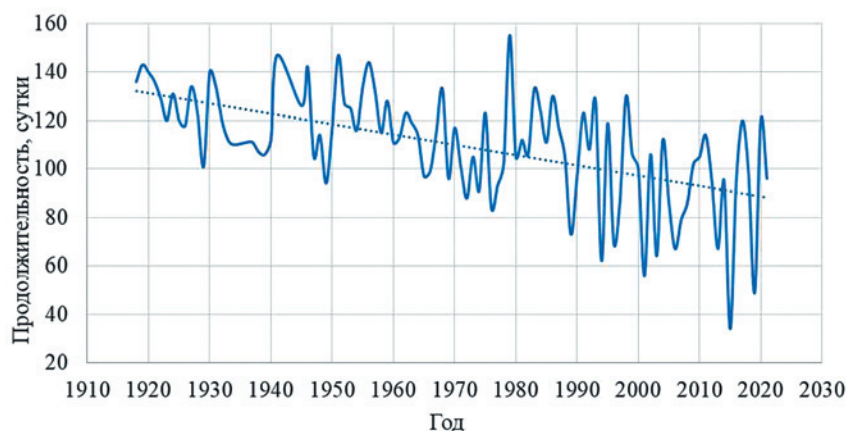


Рис. 3. Продолжительность периода с отрицательными температурами.
Fig.3. Duration of the period with negative temperatures.

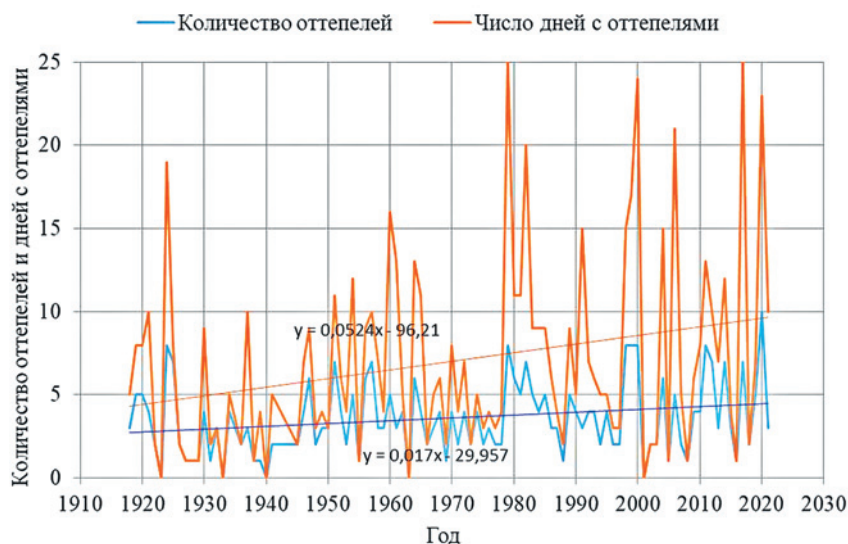


Рис. 4. Количество глубоких оттепелей и дней с оттепелями по годам наблюдений.
Fig.4. Number of deep thaws and days with thaws by year of observation

обычно наблюдается чувствительная фильтрация стаявшего снега в почвенные и грунтовые воды. Результаты представлены на рис. 3 и рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из представленных данных таблиц 1–4 следует, что значения статистических характеристик, определенных для разных периодов, имеют чувствительные различия и во многих случаях их различия по модулю превышают численные значения среднеквадратической ошибки, особенно это касается средних значений стока. При этом нетрудно заметить, что для годовых и половодных значений два последних периода имеют меньшие значения, что является численным подтверждением уменьшения годового и половодного стока с течением времени, выявленного по разностным интегральным кривым.

Установленные тенденции изменений статистических параметров сезонного стока также численно подтверждаются результатами, приведенными в табл. 3 и табл. 4, однако для летне-осеннего и зимнего сезонов наблюдается другая направленность, соответствующая тенденциям их разностных интегральных кривых стока.

Исходя из полученных значений в табл. 5, согласно рекомендациям², были определены критерии однородности Фишера и Стьюдента для стока годовых и сезонных периодов относительно выделенных гидрологических рядов (1 – ряд 1881–2022 гг.; 2 – ряд 1971–2022 гг.; 3 – ряд 1991–2020 гг.) относительно уровня значимости $\alpha=0,05$ (табл. 5). Из численных значений таблицы можно заметить, что различия средних значений стока в указанных периодах являются статистически значимыми для всех внутригодовых сезонов за исключением пары рядов последних десятилетий (1971–2022 гг. и 1991–2020 гг.). Для них средние значения стока можно считать практически одинаковыми для всех сезонов. Что же касается дисперсий, можно утверждать, что они значительно различаются в основном для половодного и годового стока в парах 1–2 и 1–3 указанных гидрологических рядов. Следовательно гидрологические ряды 1971–2022 гг. и 1991–2020 гг. могут считаться статистически однородными и взаимозаменяемыми в статистическом смысле.

Таблица 5. Значения критерия Фишера (F) и Стьюдента (t) и соответствующие критические значения (F_т и t_т)

Table 5. Values of Fisher (F) and Student (S) criteria and the corresponding critical values (F_t and t_t)

F между рядами	Годовой сток		Половодье		Лето-осень		Зима	
	Критерий Фишера							
	F	F _т	F	F _т	F	F _т	F	F _т
F _{1/2}	2,0	1,5	3,0	1,5	1,0	1,5	1,4	1,5
F _{1/3}	2,3	1,7	4,0	1,7	1,0	1,55	2,5	1,7
F _{2/3}	1,1	1,8	1,4	1,8	1,05	1,69	1,75	1,77
t между рядами	Критерий Стьюдента							
	t	t _т	t	t _т	t	t _т	t	t _т
	t _{1/2}	3,59	1,98	5,7	1,98	3,0	1,97	4,2
t _{1/3}	2,8	2,0	5,7	1,99	4,0	2,0	5,7	2,00
t _{2/3}	0,3	2,0	0,3	2,0	1,42	1,99	1,3	2,0

Изменение традиционных статистических параметров (среднее, C_v и C_s) не считается окончательным критерием изменения характеристик стока, поскольку при разработке ПИВР и их актуализации составляются водохозяйственные балансы, основой которых являются объемы стока обеспеченности 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 % и 95 %. Для их оценки и общего заключения о вероятностных колебаниях стока были построены аналитические кривые обеспеченности, отражающие перечисленные квантили распределения. Объективность этих значений определяется объективностью ряда наблюдений, на

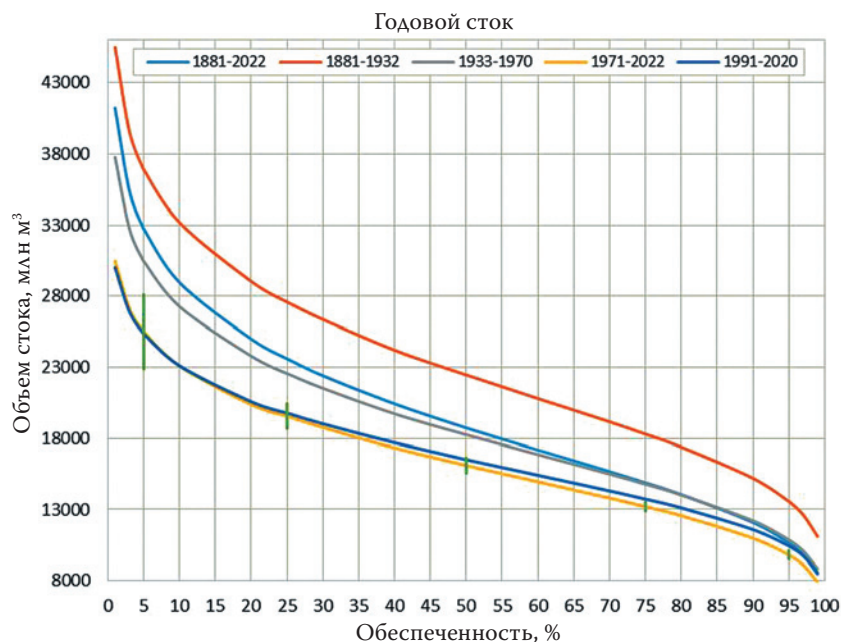


Рис. 5. Кривые обеспеченности годового объема стока за разные периоды наблюдений.
 Fig. 5. Probabilistic curves of annual runoff volume for different periods of observation.

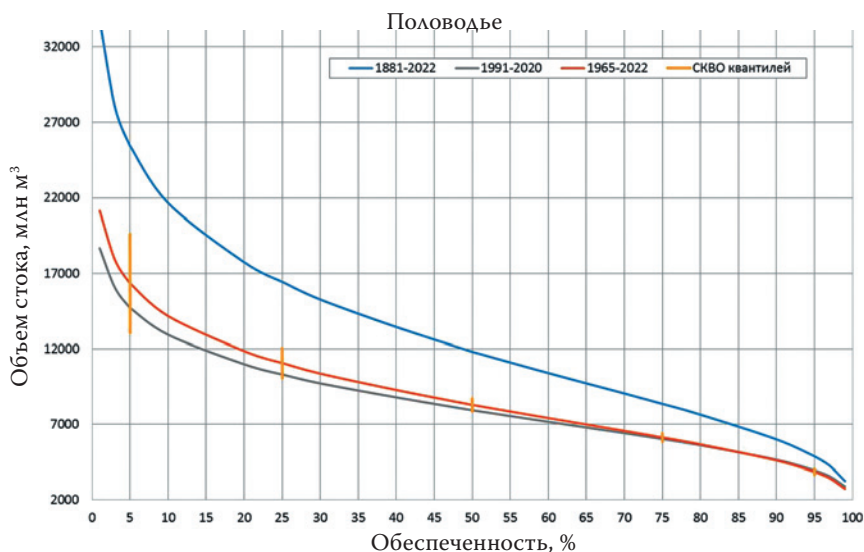


Рис. 6. Кривые обеспеченности объемов половодья за разные периоды наблюдений.
 Fig. 6. Probabilistic curves of flood volumes for different observation periods.

основе которых получены основные статистические параметры кривых обеспеченности. В данном случае для выбранных в качестве расчетных периодов наблюдений построены кривые обеспеченности годовых (рис. 5) и сезонных значений стока (рис. 6–8).

Вертикальные отрезки на рис. 5 соответствуют диапазону 2σ – двойной среднеквадратической ошибки ординат 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 % относитель-

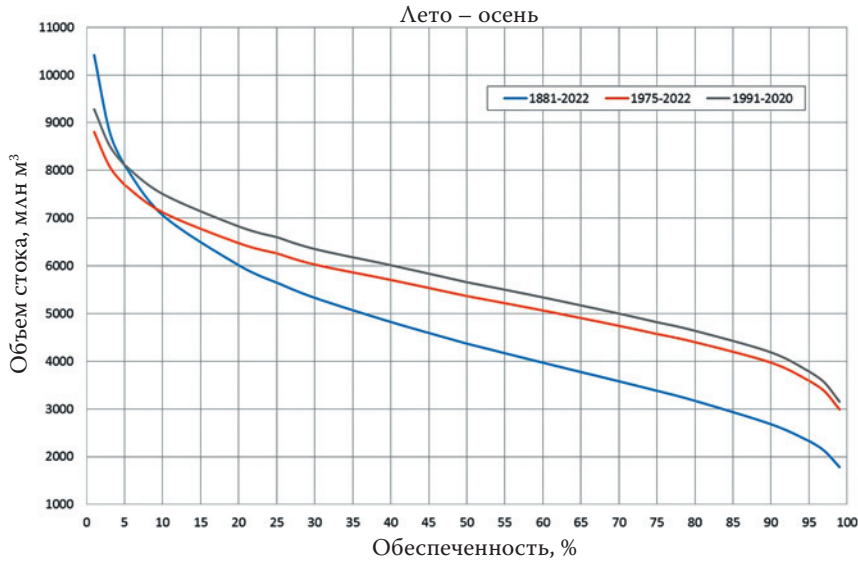


Рис. 7. Кривые обеспеченности объемов стока летне-осенней межени за разные периоды наблюдений.

Fig. 7. Probabilistic curves of runoff volumes during summer-autumn low water periods for different periods of observation.

но кривой обеспеченности, построенной по данным периода 1971–2022 гг. Как видно из рис. 5, кривые распределений периодов 1971–2022 и 1991–2020 годов являются достаточно близкими. Все остальные рассмотренные периоды существенно отличаются своей большей водностью. Таким образом, можно заключить, что для достаточно объективных расчетов регулирования стока Цимлянским водохранилищем на современном этапе можно принять гидрологический ряд годовых значений из периода с 1971 по 2022 годы.

Из данных рис. 6 также очевидно, что к современному периоду сток половодья существенно сократился, а аналогичные диапазоны 2σ ординат 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, и 95 % относительно кривой обеспеченности, построенной по данным периода 1965–2022 гг. свидетельствуют о том, что можно выбрать ряд из этого периода для проведения расчетов в рамках принятых погрешностей.

Данные из рис. 7 позволяют заключить, что летне-осенний сток за весь период характеризуется существенной асимметрией, а сток периода 1975–2022 гг. отличается несущественно (в рамках 2σ) от стока за период 1991–2020 гг. При этом сток обоих этих периодов значительно больше стока всего периода наблюдений в зоне обеспеченности с 20 % до 100 %. Аналогичный вывод можно сделать и относительно стока за зимний сезон по рис. 8.

В целом, из совокупности приведенных разностных интегральных кривых и кривых обеспеченности величины годового и сезонного стоков можно повторить вывод, что величины стока годовых интервалов и половодья в последние десятилетия стали существенно меньше, а величины зимнего и летне-осеннего стока увеличились. Для объективности водохозяйственных расчетов Цимлянского водохранилища необходимо выбирать период последних десятилетий. В данном случае представляется наиболее объективным вы-

брать расчетный хронологический ряд из периода с 1975 по 2022 годы с учетом анализа подробности и качества данных о стоке, водопотреблении и элементах водного баланса как самого водохранилища, так и его водосбора в целом.

Исходя из совокупного анализа осадков и испарения [3, 20, 21] с водосбора в последние десятилетия, можно сделать вывод, что эти основные элементы водного баланса на водосборе не являются статистически значимыми и не могли привести к существенным изменениям стока как относительно его сезонных величин, так и годовых.

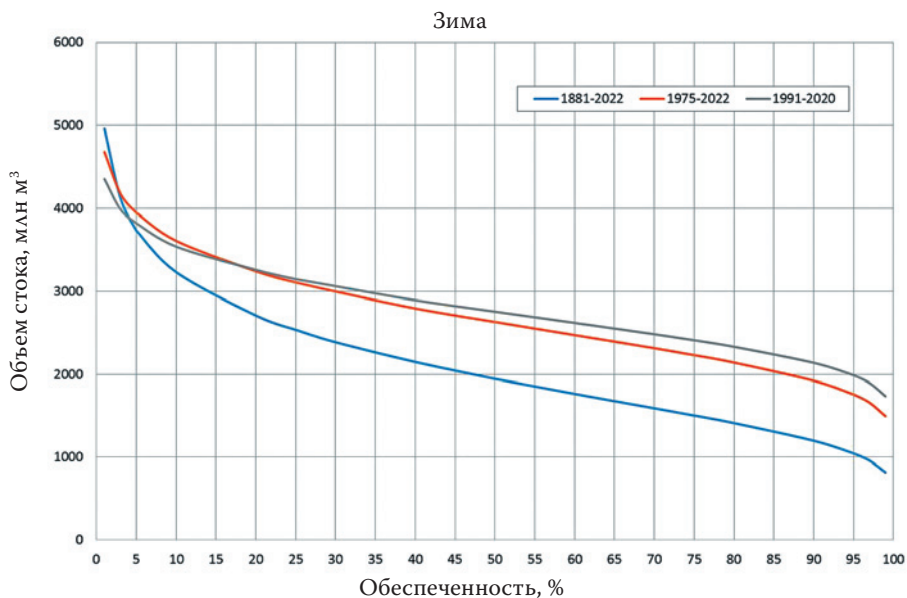


Рис. 8. Кривые обеспеченности объемов стока зимней межени за разные периоды наблюдений.

Fig. 8. Probabilistic curves of winter low-water flow volumes for different observation periods.

В рамках проверки гипотезы о влиянии участвовавших оттепелей на увеличение стока зимней межени проанализированы изменение температурного режима в зимние периоды на основе представленных выше рис. 3 и рис. 4. Исходя из конфигураций их графиков и трендов, однозначно можно констатировать, что длительность периода с отрицательными температурами существенно сократилась. В частности, их средняя продолжительность с 1918 г. по 1979 г. составила 119 суток, с 1980 по 2021 – 97 суток, т. е. в последние десятилетия ряд выпавших осадков перешел из снежного вида в дождевой с немедленной фильтрацией в почвогрунты. Количество глубоких оттепелей увеличилось, как и число суток с температурой выше 2,5 °С, несмотря на сокращение длительности зимнего периода. Соответственно, фильтрация в почвенные и грунтовые воды заведомо возросла, что свидетельствует, по крайней мере, о частичном повышении грунтовых вод и водности зимней межени за счет оттепелей и сокращения периода с отрицательными температурами.

В целом, отмеченные тенденции водности современного периода на рассматриваемом речном бассейне связаны с различными причинами. По всей

видимости, понижение годового и половодного стока, в первую очередь, связаны с интенсивным строительством различного вида гидротехнических сооружений и повышением общего водопользования с начала 1970-х годов.

Причинами повышения водности на реках в меженный период могут быть:

а) зафиксированное на наблюдательных скважинах повышение уровня грунтовых вод [3], которое могло возникнуть ввиду возможного их поступления из-за пределов Донского речного бассейна, а также их пополнения в зимний период во время участвовавших оттепелей;

б) после орошения – возвратные воды, поступившие сначала в грунтовые воды, а затем в речную сеть, а также сбросные воды в нижний бьеф гидроузлов;

в) воды предприятий промышленности, взятые из грунтовых горизонтов, но сброшенные в речную сеть;

г) специальные попуски в нижний бьеф водохранилищ.

Некоторые элементы из представленных выводов могут быть скорее гипотезами, чем утверждениями, поскольку они должны проверяться, в т. ч. с помощью новых исследований и критериев.

Несмотря на то, что выбор периода гидрологического ряда наблюдений для разработки эффективных правил регулирования стока зависит от условий формирования стока, климатических и антропогенных изменений на водосборе, для речных бассейнов водохранилищ Европейской территории России можно рекомендовать предложенный подход, который опирается на инструмент разностной интегральной кривой стока, выделению из анализа этой кривой характерных периодов водности, оценки однородности таких периодов, сравнение квантилей построенных кривых обеспеченности стока за выбранные периоды с их статистическими погрешностями.

ВЫВОДЫ

Предложенный подход к выбору репрезентативного гидрологического ряда наблюдений для получения достаточно объективных водохозяйственных характеристик регулирования стока Цимлянским водохранилищем на современном этапе может считаться приемлемым и на его основе могут разрабатываться и актуализироваться правила использования водных ресурсов (ПИВР).

Для объективных водохозяйственных расчетов Цимлянского водохранилища и актуализации ПИВР рекомендуется выбирать период последних десятилетий с 1975 по 2022 годы с учетом анализа подробности и качества данных о стоке, водопотреблении и элементах водного баланса как самого водохранилища, так и его водосбора в целом. В этом плане предпочтителен период с 1981 года по 2022 год, для которого имеются выверенные суточные данные притока к Цимлянскому водохранилищу.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что подход к выбору репрезентативного гидрологического ряда наблюдений для разработки ПИВР и их актуализации должен иметь индивидуальную направленность по отношению к каждому водохранилищу и опираться на конкретные условия формирования стока на водосборе с учетом климатических изменений.

На современном этапе очевидна необходимость разработки критериев к выявлению причин изменения водности р. Дон на основе детальных исследований условий формирования стока реки с учетом изменения климатических характеристик, степени взаимодействия поверхностных и грунтовых вод, ландшафтных изменений речного бассейна, степени водопользования его водными ресурсами и других антропогенных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание технологий, 2022. 124 с. Режим доступа: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения 15.04.2024).
2. State of the Global Climate. WMO-No 1347. World Meteorological Organization, 2024, P. 48. URL: https://library.wmo.int/viewer/68835/download?file=1347_Statement_2023_en.pdf&type=pdf&navigator=1 (дата обращения 15.04.2024).
3. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.А. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.
4. Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685.
5. Milliman JD, Farnsworth KL, Jones PD, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global Planetary Change*. 2008. 62. P. 187–194. DOI:10.1016/j.gloplacha.2008.03.001.
6. Добровольский С.Г., Лебедева И.П., Истомина М.Н., Соломонова И.В. Водохранилища мира: анализ количественных параметров и воздействия на структуру многолетних изменений стока регулируемых рек // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 3–15.
7. Киреева М.Б., Фролова Н.А. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 60–76. DOI: 10.35567/1999-4508-2013-1-4.
8. Bard A., Renard B., Lang M. et al. Trends in the hydrologic regime of Alpine rivers. // *Journal of Hydrology*. 2015. 529. P. 1823–1837. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.052.
9. Bormann H. and Pinter N. Trends in low flows of German rivers since 1950: comparability of different low-flow indicators and their spatial patterns // *River Resources Application*. 2017. 33. P. 1191–1204. DOI:10.1002/rra.3152.
10. Durocher M., Requena A.I., Burn D.H. and Pellerin J. Analysis of trends in annual streamflow to the Arctic Ocean // *Hydrological Processes*. 2019. 33. P. 1143–1151.
11. Gosling S.N., Taylor R.G., Arnell N.W. and Todd M. C. A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models // *Hydrological Earth System Science*. 2011. 15. P. 279–294. DOI:10.5194/hess-15-279-2011.
12. Gudmundsson L., Seneviratne S.I., and Zhang X. Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources // *Natural Climate Change*. 2017. 7. P. 813–816. DOI:10.1038/nclimate3416.
13. Masseroni D., Camici S., Cislighi A. et al. The 63-year changes in annual streamflow volumes across Europe with a focus on the Mediterranean basin // *Hydrological Earth System Science*. 2021. 25. P. 5589–560. DOI:10.5194/hess-25-5589-2021.
14. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau // *Journal of American Statistic Association*. 1968;63:1379–1389.
15. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. 13. P. 245–259.
16. Дроздов О.А. О свойствах интегрально-разностных кривых // Труды Главной геофизической обсерватории. 1962. Вып. 162. С. 3–6.
17. Belolubtsev A.I., Ilinich V.V., Dronova E.A., Asaulyak I.F. and Kuznetsov I.A. Assessment of Trends of Air Temperature Based on 140-year Observations of V.A. Mikhelson Meteorological Observatory // *Caspian Journal of Environment Science*. 2021. 5(19). P. 909–914, DOI:10.22124/cjes.2021.5265.

18. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-№168. Geneva, 2009. 738 p.
19. Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометиздат, 1977. 270 с.
20. Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водоиспарительной сети: научно-прикладной справочник / под ред. В.С. Вуглинского. СПб., 2021. 64 с.
21. Ташилова А.А. Изменения в распределении региональных осадков в ответ на глобальное потепление // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 3. С. 73–90.

REFERENCES

1. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. St. Petersburg: High technology, 2022.: Available from: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf/ (In Russ.).
2. State of the Global Climate. WMO-No 1347. World Meteorological Organization, 2024. Available from: : https://library.wmo.int/viewer/68835/download?file=1347_Statement_2023_en.pdf&type=pdf&navigator=1.
3. Dzhamalov RG, Kireeva MB, Kosolapov AE, Frolova NL. Water resources of the Don basin and their ecological state. M.: GEOS, 2017 (In Russ.).
4. Dolgov SV, Koronkevich N.I, Barabanova EA. Landscape and hydrological changes in the Don basin. *Water Resources*. 2020; 47(6): 674–685 (In Russ.).
5. Milliman JD, Farnsworth KL, Jones PD, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global Planet. Change*. 2008; 62:187–194. DOI:10.1016/j.gloplacha.2008.03.001
6. Dobrovolsky SG, Lebedeva IP, Istomina MN, Solomonova IV. Reservoirs of the world: analysis of quantitative parameters and the impact on the structure of long-term changes in the flow of regulated rivers. *Water Resources*. 2020;47(1):3-15 (In Russ.).
7. Kireeva MB, Frolova NL. Modern features of the spring flood of rivers in the Don basin. *Water Management of Russia*. 2013;1:60–76 (In Russ.).
8. Bard A, Renard B, Lang M, et al. Trends in the hydrologic regime of Alpine rivers. *Journal of Hydrology*. 2015; 529:1823–1837. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.07.052
9. Bormann H and Pinter N. Trends in low flows of German rivers since 1950: comparability of different low-flow indicators and their spatial patterns. *River Resources Application*. 2017; 33:1191–1204. DOI:10.1002/rra.3152.
10. Durocher M, Requena AI, Burn DH and Pellerin J. Analysis of trends in annual streamflow to the Arctic Ocean. *Hydrological Processes*. 2019. 33:1143–1151.
11. Gosling SN, Taylor R G, Arnell NW and Todd M C. A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. *Hydrological Earth System Sciences*. 2011;1 5:279–294. DOI:10.5194/hess-15-279-2011.
12. Gudmundsson L, Seneviratne S.I, and Zhang X. Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources. *Natural Climate Change*. 2017; 7:8 13–816. DOI:10.1038/nclimate3416.
13. Masseroni D, Camici S, Cislaghi A, et al. The 63-year changes in annual streamflow volumes across Europe with a focus on the Mediterranean basin. *Hydrological Earth System Science*. 2021; 25:5589–5601. DOI:10.5194/hess-25-5589-2021.
14. Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of American Statistical Association*. 1968;63:1379–1389.
15. Mann H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 1945;13:245–259.
16. Drozdov O.A. On the properties of integral-difference curves. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory*. 1962; 162:3-6.
17. Belolubtsev A.I., Ilinich V.V., Dronova E.A., Asulyak I.F. and Kuznetsov I.A. Assessment of Trends of Air Temperature Based on 140-year Observations of V.A. Mikhelson Meteorological Observatory. *Caspian Journal of Environment Sciences*. 2021;5(19):909-914. DOI:10.22124/cjes.2021.5265
18. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168. Geneva, 2009.

19. Rozhdestvensky A.V. Assessing the accuracy of distribution curves of hydrological characteristics. L.: Gidrometizdat, 1977 (In Russ.).
20. Long-term changes in evaporation in the European territory of Russia according to water evaporation network data. Scientific and applied reference book edited by V.S. Vuglinsky. St. Petersburg, 2021 (In Russ.).
21. Tashilova A.A. Changes in the distribution of regional precipitation in response to global warming. *Science. Innovation. Technologies*. 2021;3:73–90 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Болгов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод, главный научный сотрудник, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3; ORCID: 0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Косолапов Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, директор ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID: 0000-0001-2345-6789; e-mail: akosol@mail.ru

Бубер Владимир Борисович, канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 127550, Россия, Москва, ул. Большая Академическая, д. 44, корп. 2; e-mail: bvb2010@mail.ru

Ильинич Виталий Витальевич, канд. техн. наук, профессор, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 127550, Россия, г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44, корп. 2; e-mail: vilinitch@gmail.com

Бубер Александр Леонидович, заведующий отделом мелиоративного водохозяйственного комплекса, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 127550, Россия, Москва, ул. Большая Академическая, д. 44, корп. 2; e-mail: buber49@yandex.ru

About the authors

Mikhail V. Bolgov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Surface Water Modeling Laboratory, Chief Researcher, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 3, 119333, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0003-3193-6488, bolgovmv@mail.ru

Aleksey E. Kosolapov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0000-0001-2345-6789; e-mail: akosol@mail.ru

Vladimir B. Buber, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation ul. Bolshaya Akademicheskaya, 44, bldg. 2, Moscow, 127550 Russia; bvb2010@mail.ru

Vitaly V. Ilyinich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation ul. Bolshaya Akademicheskaya, 44, bldg. 2, Moscow, 127550 Russia; vilinitch@gmail.com

Alexander L. Buber, Head, Department of water reclamation complex, Leading Researcher, A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation ul. Bolshaya Akademicheskaya, 44, bldg. 2, Moscow, 127550 Russia; buber49@yandex.ru

Использование искусственных нейронных сетей для оценки поверхностного стока в расчетах водохозяйственного баланса бассейна реки Верхний Оронтеc

А. Слейман  , Д.В. Козлов 

 alaa-slieman@hotmail.com

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Наличие полных рядов гидрологических данных является основой для проведения расчетов водохозяйственного баланса и различных гидрологических исследований. Поверхностный сток считается одним из наиболее важных компонентов гидрологического цикла. В статье исследованы возможности применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для восстановления непрерывности рядов поверхностного стока в бассейне реки Верхний Оронтеc, необходимых для расчета водохозяйственного баланса. **Методы.** Использованы модели искусственных нейронных сетей с алгоритмами прямого и обратного распространения, а также другие алгоритмы обучения. Применены различные функции активации. Результаты обучения нейронных сетей сравнивались с помощью значений среднеквадратичной ошибки и коэффициента корреляции. Нейронная сеть 2:12:1 стала лучшей по параметрам. Проведены расчеты водохозяйственного баланса с использованием данных до и после моделирования с помощью ИНС. **Результаты.** Установлено, что использование ИНС для оценки поверхностного стока в расчетах водохозяйственного баланса для лет 50 % и 75 % обеспеченности никак не влияет на результат, в то время как водохозяйственный баланс в год 95 % обеспеченности изменился в сторону более глубокого дефицита, что потребовало комплексных мероприятий и больших усилий в части управления водными ресурсами в речном бассейне. Рекомендовано расширить использование моделей искусственного интеллекта и машинного обучения для моделирования и прогнозирования различных климатических и гидрологических характеристик с последующим сравнением их для достижения оптимального результата расчетов водохозяйственного баланса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водохозяйственный баланс, гидрологический цикл, сток, моделирование, искусственная нейронная сеть, алгоритм.

Для цитирования: Слейман А., Козлов Д.В. Использование искусственных нейронных сетей для оценки поверхностного стока в расчетах водохозяйственного баланса бассейна реки Верхний Оронтеc // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 21–37. DOI:10.35567/19994508-2024-3-21-37.

Дата поступления 09.04 2024.

USING OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO ESTIMATE SURFACE RUNOFF ON THE WATER BALANCE CALCULATIONS OF THE UPPER ORONTES RIVER BASIN

Alaa Slieman  , Dmitry V. Kozlov 

 alaa-slieman@hotmail.com

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

© Слейман А., Козлов Д.В., 2024

ABSTRACT:

Relevance. The availability of complete hydrological data series is a basis for conducting water balance calculations and various hydrological studies. Surface runoff is considered one of the most important of these data. Therefore, this article aims to study the effect of using artificial neural networks to fill the gaps in the surface runoff series in the Upper Orontes River basin on water balance calculations. **Methods.** Feed-forward and back-propagation artificial neural network models were used, along with a different set of training algorithms. Various activation functions were also used. The results of the different networks were compared using root mean square errors and correlation coefficient. The results showed that Network 2:12:1 is the best according to the comparison parameters. Water balance calculations were carried out using the data before and after the ANN modeling. **Results.** The results showed that the years with a probability of guaranteeing 50 % and 75 % of the water supply did not change in both cases, while the year 95 % had changed, and this change had a negative impact on the water balance, as the amount of the deficit increased in the water balance in the studied area, which requires comprehensive steps and greater activation of water resources management in the region to confront the risk of water shortage. This study recommends expanding the use of artificial intelligence and machine learning models to model and predict various climatic and hydrological elements and compare them to reach the optimal method of water balance calculation.

Keywords: water balance, hydrological cycle, runoff, modelling, artificial neural network, algorithms.

For citation: Slieman A., Kozlov D.V. Using of artificial neural networks to estimate surface runoff on the water balance calculations of the Upper Orontes River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 21–37. DOI:10.35567/19994508-2024-3-21-37.

Received 09.04 2024.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие воды в достаточном количестве и надлежащего качества является необходимым условием для устойчивого развития любого региона. Вода, как основной элемент системы жизнеобеспечения планеты, необходима для поддержания любой формы жизни и практически любой деятельности человека [1]. Мероприятия в области управления водными ресурсами, такие как оценка риска наводнений, управление водопотреблением, эксплуатация водохранилищ и санитария, требуют включения различных типов информации о воде для эффективного планирования и принятия решений [2].

Поверхностный сток считается одним из важнейших компонентов гидрологического цикла и существенным элементом в расчетах водохозяйственного баланса. Для оценки и прогнозирования этого элемента используются различные методы: например, ARIMA [3–5] и модель MIKE [6], данные дистанционного зондирования [7, 8], модели НЕС-HMS и WEAP [9, 10], а также метод SCS-CN [11]. Большое внимание уделяется моделям искусственного интеллекта и моделям искусственных нейронных сетей. Так, например, в работе [12] представлена модель искусственной нейронной сети (ИНС(ANN)), архитектура которой учитывает геоморфологические характеристики водосбора. Основанная на геоморфологии ИНС использована для оценки гидрографов стока после нескольких ливней с двух водоразделов р. Индианы. Сравнение ре-

зультатов валидации модели геоморфологии ИНС с наблюдаемыми гидрографами для нескольких событий на двух водосборах показало перспективность инструмента геоморфологии ИНС для оценки речного стока [12], полученной с использованием теории единичного геоморфологического гидрографа.

Безразмерные переменные в качестве входа и выхода применены в модели искусственной нейронной сети ИНС(ANN) [13], получено улучшение результатов с точки зрения различных критериев эффективности, а также упрощение структуры ИНС (ANN) для моделирования дождевого стока в пределах некоторых водосборных бассейнов рек Индии. Полученные результаты показали, что модель ИНС (ANN) с использованием безразмерных переменных смогла обеспечить лучшее представление процесса «дождь–сток» по сравнению с моделями ANN, использующими переменные процессов [13]. В исследовании [14] также рассматривается эффективность модели дождевого стока, разработанной с использованием искусственных нейронных сетей в суббассейне Йерли в верхнем течении р. Тапи в Индии. Для прогнозирования стока использована модель нейронной сети с обратным распространением (Feed-Forward Back Propagation Neural Network, FFBPNN) и модель каскадной нейронной сети с обратным распространением (Cascade Forward Back Propagation Neural Network, CFBPNN). Кроме того, в исследовании для обучения ИНС (ANN) – моделей дождевого стока применялись алгоритмы Левенберга–Марквардта (LM), Байесовской регуляризации (BR) и сопряженного градиентного масштабирования (CGS). Результаты показали, что алгоритм LM создал наиболее точную расчетную модель. Данный алгоритм работает лучше, чем алгоритмы BR и CGS: построенная на алгоритме LM ИНС-модель способна достаточно точно прогнозировать сток на исследуемой территории [14].

В настоящее время проведено много исследований по изучению водохозяйственного баланса в различных регионах, отличающихся особенностями территории и характером климатических изменений, а также свойствами и характеристиками использованных данных. Например, результаты исследования водного баланса, представленные в работе [15] по ряду участков рек в Греции, свидетельствуют о постепенном снижении поверхностного стока, что может оказать негативное воздействие на водоснабжение и управление водными ресурсами. В работе [16] исследованы долгосрочные последствия постоянного роста спроса на воду для доминирующих водных ресурсов подземных вод в штатах Вашингтон и Айдахо в США и предложен инструмент для устойчивого управления водными ресурсами.

Цель данного исследования – изучение возможностей использования искусственных нейронных сетей для заполнения пробелов в рядах поверхностного стока в бассейне р. Верхний Оронтес для расчета водохозяйственного баланса.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – поверхностные водные ресурсы р. Оронтес, сирийский участок водотока от сирийско-ливанской границы до оз. Каттина (Хомс), створ плотины Каттина.

Водные ресурсы реки используются для нужд комплексного водопотребления (коммунально-бытовое водоснабжение населенных пунктов, в т. ч. сельских, промышленных предприятий, обеспечение потребностей орошаемого земледелия), а также сохранения санитарно-экологического состояния речного водотока. Линейная схема верхнего течения р. Оронтес (Эль-Аси) до створа плотины Каттина представлена на рис. 1.

В рамках существующей схемы использования водных ресурсов проведена оценка объемов речного стока и объемов водопотребления на основе водохозяйственных и водобалансовых расчетов. С этой целью рассчитаны объемы речного стока и водопользования (водопотребления). Результаты расчетов позволяют определить возможность бездефицитного использования водных ресурсов на современном этапе развития региона, выявить периоды дефицитов потребления воды и возможных избытков.

В качестве исходной гидрологической информации использован ряд наблюдений с декабря 1987 г. по май 2011 г., состоящий из 266 месячных значений стока (расходов) р. Оронтес (Эль-Аси) на гидрометрической станции Аль-Амири на сирийско-ливанской границе и на станции Аль-Джавадия, на входе в водохранилище Каттина (Хомс), с несколькими отсутствующими данными во временном ряду.

Оценка водообеспеченности водохозяйственного комплекса (ВХК) ведется на р. Оронтес на водохозяйственном участке (ВХУ) с замыкающим створом в оз. Каттина (водохранилище Хомс, созданное гравитационной плотиной, с площадью водного зеркала 60 км² и полным объемом 200 км³) – п. Плотина Каттина.



Рис. 1. Линейная схема верхнего течения р. Оронтес (Эль-Аси) до створа плотины Каттина.

Fig. 1. Linear scheme of the Orontes (El-Asi) River upstream to the Kattina dam range.

Метод искусственных нейронных сетей

Искусственная нейронная сеть – это математическая модель и ее программно-аппаратное воплощение, построенные на принципах организации биологических нейронных сетей. ИНС как комбинации распределенной параллельной обработки в основном зависят от элементов обработки, способных действовать как локальная память в дополнение к выполнению различных операций. Элемент обработки имеет один выход, который разветвляется на множество ветвей, несущих одни и те же операции. В то время как локальная обработка остается, сигнал, выходящий из нейрона, зависит от введенных значений, а также значений, хранящихся в локальной памяти вычислительных элементов [17]. На рис. 2 в упрощенном виде показан механизм работы искусственных нейронных сетей.



Рис. 2. Механизм работы искусственных нейронных сетей.

Fig. 2. Mechanism of the artificial neural networks operation.

Искусственная нейронная сеть состоит из входного слоя, который содержит ряд нейронов, представляющих количество входов нейронной сети, и одного или нескольких скрытых слоев, которые добавляют гибкости процессу построения векторных функций между входами и выходами. На рис. 3 показана модель искусственной нейронной сети, которая содержит три слоя (входной, скрытый и выходной) [18].

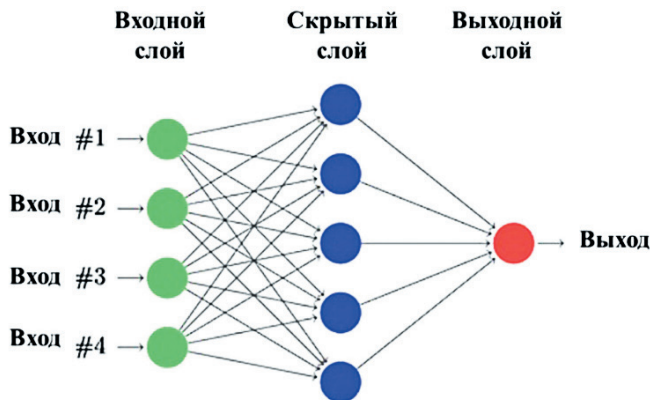


Рис.3. Модель искусственной нейронной сети с тремя слоями.

Fig. 3. The artificial neural network model with three layers.

Водохозяйственный баланс

Водохозяйственный баланс (ВХБ) является итогом водохозяйственных расчетов, осуществляемых при подготовке водохозяйственного обоснования работы водохозяйственного комплекса на участке реки, и определяет соотношение имеющихся водных ресурсов (объемов поверхностных и подземных вод, доступных для гарантированного использования при существующем или проектируемом составе водохозяйственного комплекса) и расчетного водопотребления. Объем доступных для использования водных ресурсов в границах расчетного водохозяйственного участка (ВХУ) определяется как объем стока в замыкающем створе, в нашем случае – плотина Каттина участка р. Оронтес.

На основании расчетов водохозяйственных балансов для расчетного водохозяйственного участка речного бассейна Оронтес определяется водохозяйственная обстановка соответствующего ВХУ и части речного бассейна, оценивается достаточность водных ресурсов для удовлетворения установленных водопользователям объемов допустимого забора (изъятия) вод и возможность развития водохозяйственного комплекса. Расчет постворного ВХБ выполнен по расчетным годам, близким по водности к характерной обеспеченности на ВХУ.

Структура ВХБ включает приходную (П) и расходную (Р) части, а также результат водохозяйственного баланса – $\Delta ВХБ$. Определенные составляющие баланса являются отражением инженерных решений, связанных с рациональным водопользованием, регулированием стока и его территориальным перераспределением. Результат ВХБ характеризуется наличием избытков (резервов) ($П \geq Р$) или дефицитов ($П < Р$) стока [19].

При выборе расчетного периода для ВХБ учитывается категория реки, значимая внутримесячная неравномерность стока, наличие регулирующих емкостей, соотношение объема и режима водопотребления, а также специальных (например, весенних) попусков и водного режима реки. В зависимости от данных критериев устанавливаются месячные, декадные, пентадные или суточные расчетные интервалы.

Расчеты ВХБ для рассматриваемого ВХУ выполнены для месячного интервала времени. Для расчетов ВХБ использована (в единицах объема воды за расчетный период) формула [20]:

$$\Delta ВХБ = W_{вх} + W_{бок} + W_{вв} \pm \Delta V - W_{исп} - W_{вап} - W_{кп}, \quad (1)$$

где $W_{вх}$ – объем стока, поступающий за расчетный период к входному створу (п. Аль-Джавадия) расчетного ВХУ (реки), млн м³;

$W_{бок}$ – боковая приточность на ВХУ (участке от п. Аль-Джавадия до п. Плотина Каттина), примем $W_{бок} = 0$;

$W_{вв}$ – возвратные воды на ВХУ (объем водоотведения): подземные и поверхностные воды, стекающие с орошаемых территорий, сточные и (или) дренажные воды, отводимые в водный объект (фактически это объем воды, попадающий на расчетный ВХУ со стороны действующей системы

водоотведения, который составляет 15 % от суммарного требования водопотребителей на расчетном ВХУ);

$W_{\text{исп}} = W_E$ – потери на дополнительное испарение с акватории ВХУ (оз. Каттина на р. Оронтес);

$W_{\text{вап}}$ – суммарные требования всех водопользователей (водопотребителей) расчетного ВХУ;

$W_{\text{кп}}$ – требуемая величина стока в замыкающем створе (п. Плотина Каттина) расчетного ВХУ (транзитный сток или комплексный попуск, суммирующий санитарно-экологические и хозяйственные попуски);

$\pm \Delta V$ – результат работы (наполнение/сработка) водохранилища (оз. Каттина) за расчетный период, принимаем $\pm \Delta V = 0$ как для водохранилища полного годовичного регулирования стока;

$\Delta \text{ВХБ}$ – результирующая составляющая, избыток или дефицит водных ресурсов ВХУ.

Результаты ВХБ фиксируют величину дефицита водных ресурсов D , резерв (избыток) воды $W_{\text{рез}}$ и проектный (транзитный) сток $W_{\text{пс}}$ на следующий ВХУ.

При $\Delta \text{ВХБ} \geq 0$ резерв водных ресурсов равен $W_{\text{рез}} = \Delta \text{ВХБ}$, а дефицит $D=0$. При $\Delta \text{ВХБ} < 0$ резерв водных ресурсов равен нулю $W_{\text{рез}} = 0$, а дефицит $D = -\Delta \text{ВХБ}$. В этом случае необходимо предусмотреть мероприятия по сокращению потребления воды или по увеличению ее запасов на расчетном ВХУ (например, за счет использования подземных вод, переброски стока, сокращения водопотребления в результате внедрения технологий оборотного или повторного водоснабжения и других водосберегающих мероприятий).

Уравнение ВХБ составляется для лет 50 %, 75 % и 95 % обеспеченности. Оценка водообеспеченности выполняется на основе постворного ВХБ. В ответственных масштабных водохозяйственных проектах расчет выполняется по многолетним гидрологическим рядам стока и водопотребления. В данной работе при минимальном информационном обеспечении исходными водохозяйственными и гидрологическими данными, а также с целью сокращения объемов расчетов использованы расчетные средне- и маловодные годы с 50 %, 75 % и 95 % обеспеченности. В привязке к вышеуказанному водохозяйственному участку определены и показатели водопотребления.

Месячные объемы водопотребления на рассматриваемом ВХУ (орошение с учетом коммунально-бытового хозяйства (КБХ) населенных пунктов) определены в соответствии с круглогодичным режимом подачи воды на орошение на расчетном ВХУ в объеме 136,95 млн м³, исходя из наблюдаемых среднемноголетних величин испарения и температуры воздуха.

Годовой объем сточных дренажных вод, поступающих с орошаемых участков и сбрасываемых в реку, определяется в зависимости от годового объема водопотребления для орошения всех сельскохозяйственных культур с учетом потерь. По причине низкого уровня эффективности эксплуатируемых гидромелиоративных систем в современной Сирии, примем коэффициент возврата дренажных вод с орошаемых земель в реку равным 0,15.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первую очередь, была проведена предварительная статистическая обработка исходных данных. Затем всю входную информацию разделили на три массива данных для запуска процедур обучения, валидации и тестирования в процентном соотношении 70:15:15 % (или по числу членов ряда в массивах данных 186:40:40) с помощью функции разделения (блока разделения). Функция разделения сохраняет одинаковые значения в группах данных и тем самым повышает точность сопоставления моделей.

В рамках проведенной работы было построено и обучено большое количество искусственных нейронных сетей с изменением количества входов, количества нейронов в скрытом слое, функции активации и алгоритмов обучения. Входной слой для сетей содержал два нейрона, которые представляли сток на станции Аль-Джавадия в момент времени ($t-1$) и сток на станции Аль-Амири в момент времени (t), а выходной слой содержал один нейрон, представляющий сток на станции Аль-Джавадия в момент времени (t).

Сравнение моделей ИНС зависит от коэффициента корреляции (R) и среднеквадратичной ошибки ($RMSE$). В табл. 1 представлены значения коэффициента корреляции (R) и среднеквадратичной ошибки ($RMSE$), полученные лучшими моделями ИНС.

Таблица 1. Информация об ошибках (коэффициенте корреляции (R) и среднеквадратичной ошибке ($RMSE$)) результатов, полученных лучшими моделями ИНС
Table 1. Information about errors (of R correlation coefficient) and $RMSE$ mean square error of the results obtained by the ANN best models

Модель	Топология сети (архитектура)	Обучение		Валидация		Тестирование	
		R %	$RMSE$ м ³ /с	R %	$RMSE$ м ³ /с	R %	$RMSE$ м ³ /с
(A)	2-12-1	88.941	1.4833	93.986	0.8383	94.795	0.7331
B	2-18-1	89.022	1.4277	92.494	0.9683	92.311	0.8738
C	2-6-1	88.099	1.5455	93.595	0.9670	94.4158	0.9867
D	2-10-1	87.048	1.5783	91.756	0.9631	93.312	0.8619

Как следует из данных табл. 1, сеть 2.12.1, содержащая 12 нейронов в скрытом слое, является лучшей, т. к. дала коэффициенты корреляции 88,941 %, 93,986 % и 94,795 % в периоды обучения, проверки (валидации) и тестирования соответственно, а также значения среднеквадратичной ошибки за те же периоды 1,4833, 0,8383, 0,7331 м³/с соответственно. На рис. 4 представлена модель ИНС (2,12,1), которая зависит от функции активации (тангенсигмоида) как в скрытом, так и в выходном слоях. На рис. 5 отражены характеристики модели ИНС (2,12,1) в течение периодов обучения, проверки (валидации) и тестирования, а также момент остановки обучения на этапе валидации при достижении наименьшего значения $RMSE$.

На рис. 6 представлено сравнение между оценками и значениями, рассчитанными с помощью модели ИНС в периоды проверки (валидации) и тестирования, а на рис. 7 – корреляция между измеренным стоком и стоком, рассчитанным с помощью модели ИНС за все периоды.

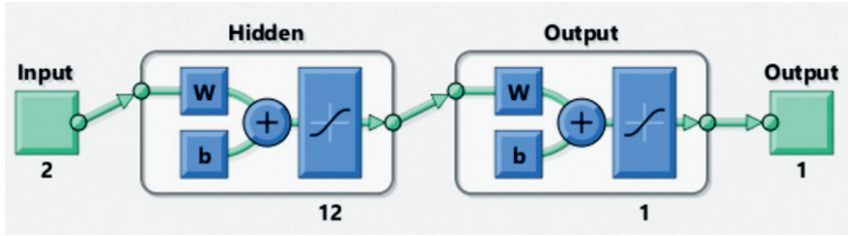


Рис. 4. Модель (2,12,1) ИНС(ANN).
Fig. 4. Model ANN (2,12,1).

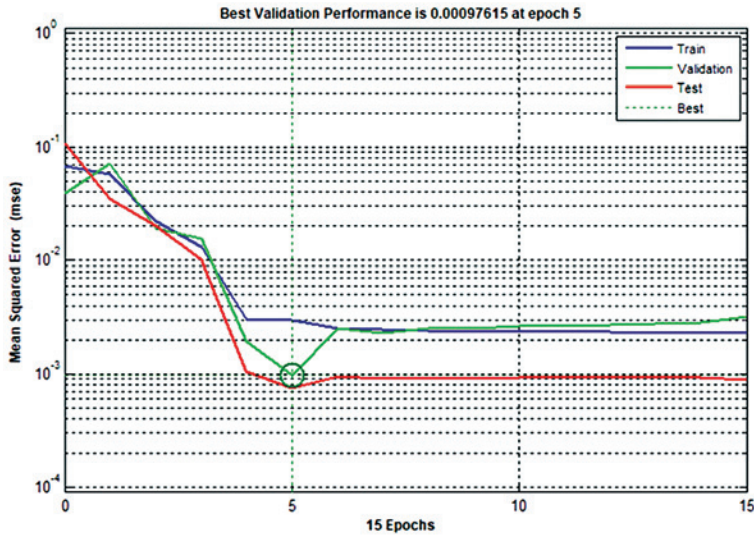


Рис. 5. Эффективность модели ИНС (ANN)(2,12,1) в периоды обучения, валидации (проверки) и тестирования.

Fig. 5. Effectiveness of ANN model (2,12,1) during the periods of training, validation and testing.

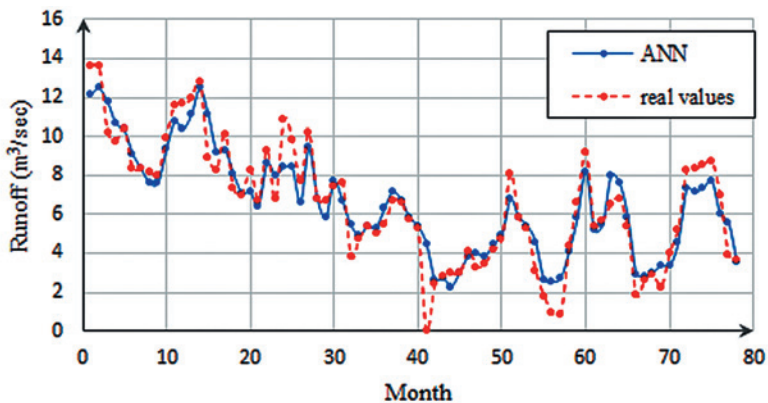


Рис. 6. Сопоставление расчетных (Target) и вычисленных с помощью ИНС (ANN) модели значений стока в периоды валидации и тестирования.

Fig. 6. Comparison of the target and calculated with ANN model runoff values during the periods of validation and testing.

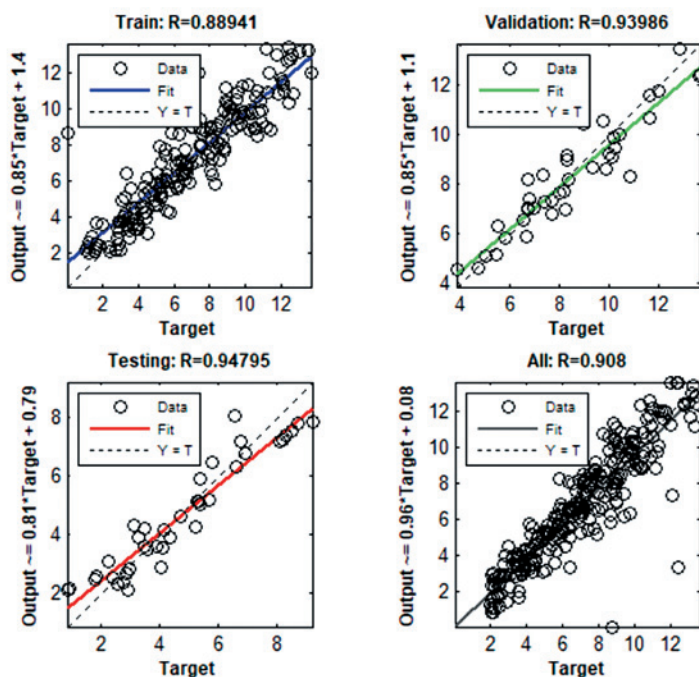


Рис. 7. Корреляция между измеренным стоком и стоком, рассчитанным с помощью ИНС(ANN) модели за весь период.

Fig. 7. Correlation between the gauged flow and the flow calculated with ANN model over the whole period.

После выбора наилучшей модели искусственной нейронной сети она была использована для заполнения пробелов во временных рядах значений поверхностного стока на исследуемой территории. Далее по уравнению (1) проведены расчеты водохозяйственного баланса на исследуемом ВХУ с использованием данных о поверхностном стоке до и после моделирования с помощью ИНС.

В табл. 2 на основании внутригодового распределения объемов водопотребления участниками ВХК и объемов транзитного (комплексного) попуска в замыкающем створе расчетного ВХУ для схемы современного ВХК (рис. 1) составлен годовой водохозяйственный баланс для года 50 % обеспеченности (с учетом потерь на испарение), в табл. 3 – для года 75 % обеспеченности (гарантированной водообеспеченности) и в табл. 4 – поверочный ВХБ для года 95 % обеспеченности. Все водохозяйственные (водобалансовые) расчеты выполнены для замыкающего створа рассматриваемого ВХУ – створа п. Плотина Каттина по формуле (1).

Установлено, что использование ИНС для оценки поверхностного стока в расчетах водохозяйственного баланса для лет 50 % и 75 % обеспеченности никак не повлияло на результат ВХБ (табл. 2 и табл. 3), в то время как водохозяйственный баланс в год 95 % обеспеченности изменился более чем на 10 % в сторону более глубокого дефицита (результаты по данным до моделирования представлены в табл. 4, по данным после моделирования – в табл. 5).

Таблица 2. Годовой водохозяйственный баланс для года 50 % обеспеченности (с учетом потерь на испарение)

Table 2. Annual water balance for a year of 50 % probability (with taking into account the evaporation losses)

Вид попуска	Месяц, j = 1...12												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Приходная часть ВХБ (П)													
Располагаемые ресурсы поверхностных вод, $W_{\text{приг}} = W_{\text{вх}} + W_{\text{бок}}$, млн м ³	28,96	23,83	20,50	26,42	18,08	17,24	19,79	20,49	9,90	12,66	14,01	13,42	225,31
Возвратные воды на ВХУ, $W_{\text{вв}}$, млн м ³	0,64	0,78	1,12	1,54	2,11	2,55	2,78	2,66	2,42	1,95	1,25	0,75	20,54
Итого по приходной части ВХБ, млн м ³	29,61	24,61	21,61	27,96	20,19	19,80	22,58	23,15	12,32	14,60	15,26	14,17	245,85
Расходная часть ВХБ (Р)													
Потери на дополнительное испарение с акватории ВХУ, $W_{\text{исп}}$, млн м ³	1,29	1,57	2,40	3,37	4,89	6,18	6,82	6,13	5,30	4,15	2,44	1,38	45,92
Суммарное требование водопользователей, $W_{\text{вдп}}$, млн м ³	4,28	5,18	7,44	10,28	14,06	17,00	18,56	17,74	16,12	13,00	8,31	4,98	136,95
Требуемый объем комплексного (транзитного) попуска, $W_{\text{кп}}$, млн м ³	4,02	3,62	4,02	3,89	4,02	3,89	4,02	4,02	3,89	4,02	3,89	4,02	47,32
Итого по расходной части ВХБ, млн м ³	9,59	10,37	13,86	17,54	22,97	27,07	29,40	27,89	25,31	21,17	14,64	10,38	230,19
Результат ВХБ (ΔВХБ)													
Дефицит водных ресурсов, $D = -\Delta\text{ВХБ} < 0$, млн м ³					2,77	7,27	6,83	4,74	12,99	6,56			
Резерв (избыток) водных ресурсов, $W_{\text{рез}} = \Delta\text{ВХБ} \geq 0$, млн м ³	20,02	14,22	7,76	10,42							0,62	3,79	15,66
Проектный сток на нижележащий ВХУ, млн м ³	4,02	3,64	4,02	3,89	4,02	3,89	4,02	4,02	3,89	4,02	3,89	4,02	47,32

Таблица 3. Годовой водохозяйственный баланс для года 75 % обеспеченности (с учетом потерь на испарение)

Table 3. Annual water balance for a year of 75 % probability (with taking into account the evaporation losses)

Вид попуска	Месяц, j = 1...12												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Приходная часть ВХБ (П)													
Располагаемые ресурсы поверхностных вод, $W_{\text{прит}} = W_{\text{вх}} + W_{\text{бок}}$, млн м ³	14,73	16,15	17,52	15,00	14,20	8,99	6,37	7,44	7,62	7,90	10,63	8,79	135,34
Возвратные воды на ВХУ, $W_{\text{вв}}$, млн м ³	0,64	0,78	1,12	1,54	2,11	2,55	2,78	2,66	2,42	1,95	1,25	0,75	20,54
Итого по приходной части ВХБ, млн м ³	15,37	16,92	18,63	16,54	16,30	11,54	9,16	10,10	10,04	9,85	11,87	9,54	155,88
Расходная часть ВХБ (Р)													
Итого по расходной части ВХБ, млн м ³	9,51	10,69	13,78	17,59	22,89	27,13	29,33	27,82	25,36	21,09	14,70	10,30	230,19
Результат ВХБ (ΔВХБ)													
Дефицит водных ресурсов, $D = -\Delta ВХБ < 0$, млн м ³				0,99	6,66	15,53	20,25	17,79	15,27	11,31	2,77	0,84	74,30
Резерв (избыток) водных ресурсов, $W_{\text{рез}} = \Delta ВХБ \geq 0$, млн м ³	5,79	6,53	4,78										

В рамках проведенного исследования разработаны модели ИНС для оценки среднемесячных значений стока на станции Аль-Джавадия с использованием в качестве входных данных значения стока на станции Аль-Амири в момент времени (t) и стока на станции Аль-Джавадия в момент времени (t-1). Подготовлено и обучено большое количество искусственных нейронных сетей с изменением количества входов, количества нейронов в скрытом слое, функции активации и алгоритмов обучения. Каждая нейронная сеть была обучена более чем в 1000 итерационных циклах, лучшие ИНС выбраны на основе полученных значений коэффициента корреляции и среднеквадратичных ошибок. Результаты сравнения показали, что сеть ИНС 2-12-1, содержащая 12 нейронов в скрытом слое, продемонстрировала высокую эффективность с большими значениями коэффициентов корреляции и низкими значениями среднеквадратичных ошибок.

Таблица 4. Поверочный годовой водохозяйственный баланс для года 95 % обеспеченности (с учетом потерь на испарение) до моделирования
 Table 4. Checking annual water balance for a year of 95 % probability (with taking into account the evaporation losses) before modelling

Вид попуска	Месяц, j = 1...12												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Приходная часть ВХБ (П)													
Располагаемые ресурсы поверхностных вод, $W_{\text{прит}} = W_{\text{вх}} + W_{\text{бок}}$, млн м ³	13,83	12,81	18,03	12,05	9,97	10,38	11,72	4,18	3,27	7,61	7,48	7,85	119,18
Возвратные воды на ВХУ, $W_{\text{вв}}$, млн м ³	0,64	0,78	1,12	1,54	2,11	2,55	2,78	2,66	2,42	1,95	1,25	0,75	20,54
Итого по приходной части ВХБ, млн м ³	14,47	13,59	19,15	13,59	12,08	12,93	14,51	6,84	5,69	9,56	8,72	8,60	139,72
Расходная часть ВХБ (Р)													
Итого по расходной части ВХБ, млн м ³	9,51	10,69	13,78	17,59	22,89	27,13	29,33	27,82	25,36	21,09	14,70	10,30	230,19
Результат ВХБ (ΔВХБ)													
Дефицит водных ресурсов, $D = -\Delta ВХБ < 0$, млн м ³				3,95	10,89	14,14	14,90	21,06	19,62	11,60	5,92	1,78	90,47
Резерв (избыток) водных ресурсов, $W_{\text{рез}} = \Delta ВХБ \geq 0$, млн м ³	4,89	3,20	5,30										

Расчеты постворных водохозяйственных балансов для ВХУ в верхнем течении р. Оронте с использованием данных до и после моделирования стока показали, что в годы 50 % и 75 % обеспеченности ВХБ не изменились, а в год 95 % обеспеченности результат ВХБ изменился более чем на 10 % в сторону увеличения дефицита, что потребовало комплексных мероприятий и больших усилий в части управления водными ресурсами в исследуемом речном бассейне.

В год 95 % обеспеченности по стоку полностью удовлетворяются потребности санитарии, т. е. сохраняются минимальные санитарные расходы в р. Оронте (на участке реки ниже плотины Каттина). Ограничения должны вводиться, в первую очередь, для орошения с целью исключения перебоев с водой.

Таблица 5. Поверочный годовой водохозяйственный баланс для года 95 % обеспеченности (с учетом потерь на испарение) после моделирования
 Table 5. Checking annual water balance for a year of 95 % probability (with taking into account the evaporation losses) after modelling

Вид попуска	Месяц, j = 1...12												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Приходная часть ВХБ (П)													
Располагаемые ресурсы поверхностных вод, $W_{\text{приг}} = W_{\text{вх}} + W_{\text{бок}}$, млн м ³	9,29	10,04	12,59	21,00	15,53	13,66	8,30	4,82	2,33	2,25	4,74	5,04	109,60
Возвратные воды на ВХУ, $W_{\text{вв}}$, млн м ³	0,64	0,78	1,12	1,54	2,11	2,55	2,78	2,66	2,42	1,95	1,25	0,75	20,54
Итого по приходной части ВХБ, млн м ³	9,94	10,82	13,70	22,54	17,64	16,21	11,09	7,48	4,75	4,20	5,99	5,78	130,14
Расходная часть ВХБ (Р)													
Итого по расходной части ВХБ, млн м ³	9,51	10,69	13,78	17,59	22,89	27,13	29,33	27,82	25,36	21,09	14,70	10,30	230,19
Результат ВХБ (ΔВХБ)													
Дефицит водных ресурсов, $D = -\Delta\text{ВХБ} < 0$, млн м ³			0,15		5,32	10,86	18,32	20,41	20,56	16,96	8,65	4,59	100,04
Резерв (избыток) водных ресурсов, $W_{\text{рез}} = \Delta\text{ВХБ} \geq 0$, млн м ³	0,35	0,43		5,00									

Возникновение дефицита воды в отдельные расчетные интервалы времени (месяцы) при отсутствии его в годовом балансе средневодного (50 % обеспеченности) года требует проведения мероприятий по регулированию стока. С учетом намечаемых регулирующих мероприятий по устранению месячного дефицита воды и улучшению ее качества водохозяйственный баланс должен составляться заново.

Выводы, сделанные на основе расчета водохозяйственного баланса, позволяют сформулировать основные водохозяйственные проблемы и задачи развития водохозяйственного комплекса и предложить соответствующие мероприятия по его эффективному развитию. Если современный водохозяйственный баланс сведется без дефицита, очевидна положительная роль комплексных водохозяйственных мероприятий по экономии водных ресурсов и

регулированию количества и качества воды. Если годовых объемов воды в год гарантированной водоотдачи (75 % обеспеченности) хватает для обеспечения всех участников водохозяйственного комплекса, но при этом наблюдаются дефициты в некоторые месяцы, необходимо предусмотреть создание аккумулялирующей емкости для регулирования стока в течение года (в рамках имеющегося объема водохранилища Хомс – оз. Каттина). Если в год поверочной 95 % обеспеченности выявлен дефицит воды не только в определенные месяцы, но и в годовом объеме, необходимо ограничить водопотребление в годовом разрезе для исключения перебоев с водой.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы модели искусственных нейронных сетей были использованы для моделирования поверхностного стока в бассейне р. Оронте (верховье) в Сирии и заполнения пробелов в ряде данных. Эти модели показали высокую способность оценивать поверхностный сток на исследуемой территории.

Модели искусственных нейронных сетей использованы для заполнения пробелов в рядах поверхностного стока на станции Аль-Джавадия. Выполнены расчеты водохозяйственного баланса на исследуемом водохозяйственном участке по данным до и после моделирования стока с помощью ИНС. Результаты показали, что в годы 50 % и 75 % обеспеченности итоговые водохозяйственные балансы не изменились, в то время как в год 95 % обеспеченности использование смоделированного с помощью ИНС стокового ряда привело к увеличению дефицита водохозяйственного баланса более чем на 10 %, что, естественно, потребует проведения комплексных мероприятий по управлению водными ресурсами в речном бассейне.

Рекомендовано расширить использование моделей искусственного интеллекта и машинного обучения для моделирования и прогнозирования различных климатических и гидрологических характеристик с последующим сравнением их для достижения оптимального результата расчетов водохозяйственного баланса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zbigniew W. Kundzewicz (1997) Water resources for sustainable development. // *Hydrological Sciences Journal*. 42:4. P. 467–480. DOI: 10.1080/02626669709492047.
2. Jahandideh-Tehrani, M., Bozorg-Haddad, O., & Daliakopoulos, I. N. The role of water information and data bases in water resources management. In *Essential tools for water resources analysis, planning, and management*. Singapore: Springer Singapore. 2021. P. 59–83.
3. Montanari A. and R. Rosso, Fractionally differenced ARIMA models applied to hydrologic time series: Identification, estimation, and simulation // *Water resources research*. 1997. Vol. 33. No. 5. P. 1035–1044.
4. Ghanbarpour M.R., Abbaspour K.C., Jalalvand G. and Moghaddam G.A. – Stochastic modeling of surface stream flow at different time scales: Sangsoorakh karst basin, Iran // *Journal of Cave and Karst Studies*. 2010. Vol. 72. No. 1. P. 1–10. DOI: 10.4311/jcks2007ES0017.
5. Valipour M. Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA models in the United States // *Meteorological Applications*. 22: 592–598 (2015), DOI: 10.1002/met.1491
6. Ghebrehiwot, A.A., & Kozlov, D. V. (2020). Assessment of applicability of MIKE 11-NAM hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin // *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition & Development*, 20(4).

7. Huang Q., Qin G., Zhang Y., Tang Q., Liu C., Xia J., ... & Post D. Using remote sensing data-based hydrological model calibrations for predicting runoff in ungauged or poorly gauged catchments // *Water Resources Research*. 202056(8). e2020WR028205.
8. Nazeer A., Maskey S., Skaugen T., & McClain M.E. Simulating the hydrological regime of the snow fed and glacierised Gilgit Basin in the Upper Indus using global precipitation products and a data parsimonious precipitation-runoff model // *Science of the Total Environment*, 2022. 802. 149872.
9. Rajendran M., Gunawardena E. R. N., & Dayawansa N. D. K. Runoff prediction in an ungauged catchment of Upper Deduru Oya Basin, Sri Lanka: A comparison of HEC-HMS and WEAP models // *International Journal of Progressive Science Technologies*. 2020. 18. 121-129.
10. Ben Khélifa, W., & Mosbahi, M. Modeling of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for an urban ungauged watershed in Tunisia // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2021. 1-10.
11. Nageswara Rao K. Analysis of surface runoff potential in ungauged basin using basin parameters and SCS-CN method. // *Applied Water Science*. 2020. 10. 1-16.
12. Zhang B., Govindaraju R.S., Geomorphology-based artificial neural networks (GANNs) for estimation of direct runoff over watersheds // *Journal of Hydrology*. 2003. 273. 18–34
13. Goyal M. and Ojha C. Analysis of Mean Monthly Rainfall Runoff Data of Indian Catchments Using Dimensionless Variables by Neural Network // *Journal of Environmental Protection*. 2010. Vol. 1. No. 2. P. 155–171. DOI: 10.4236/jep.2010.12020.
14. Mohseni U., Muskula S.B. (). Rainfall-runoff modeling using artificial neural network—a case study of purna sub-catchment of Upper Tapi Basin, India // *Environmental Sciences Proceedings*. 2023. 25(1). 1.
15. Mavromatis T., Stathis D. (). Response of the water balance in Greece to temperature and precipitation trends // *Theoretical and Applied Climatology*. 2011. 104. 13-24.
16. Dhungel R., Fiedler F. Water balance to recharge calculation: Implications for watershed management using systems dynamics approach // *Hydrology*. 2016. 3(1). 13.
17. Solaimani K. Rainfall-runoff prediction based on artificial neural network (a case study: Jarahi watershed) // *American-Eurasian Journal of Agriculture. & Environmental Sciences*, 2009. 5(6). 856-865.
18. Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. Искусственные нейронные сети и приложения. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2018. 121 с.
19. Красов В.Д., Черемисинов А.Ю. Оценка водообеспеченности территорий на основе водохозяйственного баланса // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2011. № 4. С. 246–250.
20. Красов В.Д. Методические аспекты построения водохозяйственных балансов // *Вестник Воронежского государственного университета*. 2007. Сер. География. Геоэкология. № 2. С. 18–25.

REFERENCES

1. Zbigniew W. Kundzewicz. Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*. 42:4. 1997. P. 467–480. DOI: 10.1080/02626669709492047.
2. Jahanddideh-Tehrani, M., Bozorg-Haddad, O., & Daliakopoulos, I. N. (). The role of water information and data bases in water resources management. *Essential tools for water resources analysis, planning, and management*. Singapore: Springer Singapore: 2021. P. 59–83
3. Montanari A. and Rosso R., Fractionally differenced ARIMA models applied to hydrologic time series: Identification, estimation, and simulation. *Water resources research*. 1997. Vol. 33. No. 5. P. 1035–1044.
4. Ghanbarpour M.R., Abbaspour K.C., Jalalvand G., and Moghaddam G.A. – Stochastic modeling of surface stream flow at different time scales: Sangsoorakh karst basin, Iran. *Journal of Cave and Karst Studies*. 2010. Vol. 72. No. 1. P. 1–10. DOI: 10.4311/jcks2007ES0017.
5. Valipour M., Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA models in the United States. *Meteorological Applications*. 2015. 22: 592–598. DOI: 10.1002/met.1491.
6. Ghebrehiwot A.A., & Kozlov D.V. Assessment of applicability of MIKE 11-NAM hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition & Development*. 2020. 20 (4).

7. Huang Q., Qin G., Zhang Y., Tang Q., Liu C., Xia J. & Post D. (). Using remote sensing data-based hydrological model calibrations for predicting runoff in ungauged or poorly gauged catchments. *Water Resources Research*. 2020. 56(8). e2020WR028205.
8. Nazeer A., Maskey S., Skaugen T., & McClain M.E. Simulating the hydrological regime of the snow fed and glacierised Gilgit Basin in the Upper Indus using global precipitation products and a data parsimonious precipitation-runoff model. *Science of The Total Environment*. 2022. 802. 149872.
9. Rajendran M., Gunawardena E.R.N., & Dayawansa N.D.K. Runoff prediction in an ungauged catchment of Upper Deduru Oya Basin, Sri Lanka: A comparison of HEC-HMS and WEAP models. *International Journal of Progressive Science Technologies*. 2020. 18. 121–129.
10. Ben Khélifa W., & Mosbahi M. Modeling of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for an urban ungauged watershed in Tunisia. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2021. 1-10.
11. Nageswara Rao K. (). Analysis of surface runoff potential in ungauged basin using basin parameters and SCS-CN method. *Applied Water Science*. 2020. 10. 1–16.
12. Zhang B., Govindaraju R.S., Geomorphology-based artificial neural networks (GANNs) for estimation of direct runoff over watersheds. *Journal of Hydrology*. 2003. 273. 18–34.
13. Goyal M. and Ojha C. Analysis of Mean Monthly Rainfall Runoff Data of Indian Catchments Using Dimensionless Variables by Neural Network. *Journal of Environmental Protection*. Vol. 1 No. 2. 2010. P. 155–171. DOI: 10.4236/jep.2010.12020.
14. Mohseni U., Muskula S.B. Rainfall-runoff modeling using artificial neural network—a case study of purna sub-catchment of Upper Tapi Basin, India. *Environmental Sciences Proceedings*. 2023. 25(1). 1.
15. Mavromatis T., Stathis D. Response of the water balance in Greece to temperature and precipitation trends. *Theoretical and Applied Climatology*. 2011. 104. 13–24.
16. Dhungel R., & Fiedler F. Water balance to recharge calculation: Implications for watershed management using systems dynamics approach. *Hydrology*. 2016. 3(1). 13.
17. Solaimani, K. Rainfall-runoff prediction based on artificial neural network (a case study: Jarahi watershed). *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*. 2009. 5(6). 856–865.
18. Gafarov F.M., Galimyanova A.F. Artificial neural networks and applications. Kazan University Publishing. 2018. 121 p. (In Russ.).
19. Krasov V.D., Cheremisinov A.Y. Assessment of the territories water availability based on water balance. *Newsletter of Voronezh State Agrarian University*. 2011. No. 4. P. 246–250 (In Russ.).
20. Krasov V.D. Methodical aspects of the water balances' composing. *Newsletter of Voronezh State Agrarian University*. Series: Geography. Geo/ecology. 2007. No. 2. P. 18–25 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Слейман Алаа, аспирант, кафедра гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, оф. 606; ORCID: 0000-0003-0759-8175; e-mail: alaa-slieman@hotmail.com

Козлов Дмитрий Вячеславович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, оф. 606; РИНЦ ID: 5878-6674; Scopus: 36787104800; Researcher ID: B-4808-2016; ORCID: 0000-0002-9440-0341; e-mail: kozlovdv@mail.ru

About the authors:

Alaa Slieman, PhD student, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) MGSU, Yaroslavl'skoe Shosse 26, room 606 G. Moscow, Russia, ORCID: 0000-0003-0759-8175; e-mail: alaa-slieman@hotmail.com

Dmitry V. Kozlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) MGSU, Yaroslavl'skoe Shosse 26, room 606 G. Moscow, Russia, РИНЦ ID: 5878-6674, Scopus: 36787104800, Researcher ID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341, e-mail: kozlovdv@mail.ru

Потребность населения в воде: принципы нормоформирования

А.И. Соколов^{1,2}  , К.Л. Соколов³ 

 sokolovli@mail.ru

¹Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

³Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. С учетом растущего дефицита водных ресурсов в статье проанализированы нормы и расходы водопотребления в России и за рубежом. На примере г. Вологды исследованы структура и динамика изменения водопотребления, определены условия его снижения. **Методы.** При анализе данных о водопотреблении использован статистический метод, расчетно-аналитический метод применен при определении норм потребления воды. Возможное снижение водопотребления и определение размера потерь воды проведено методом экспертных оценок, а также экспериментальными методами исследования в эксплуатационных условиях. **Результаты.** Предложены направления сокращения водопотребления населением: использование водосберегающего оборудования, учет частоты использования сантехнического оборудования при формировании норм и тарифов, пересмотр необоснованных норм удельного водопотребления. Показаны традиционные и современные методы установления нормативов водопотребления (расчетный, аналоговый и экспертный), выполнена детализация структуры водопотребления. Проведено сравнение российских и зарубежных методик нормирования водопотребления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: норма водопотребления, методы нормоформирования, удельное водопотребление, структура водопотребления.

Для цитирования: Соколов А.И., Соколов К.Л. Потребность населения в воде: принципы нормоформирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 38–52. DOI:10.35567/19994508-2024-3-38-52.

Дата поступления 30.11.2023.

THE POPULATION'S NEED FOR WATER: THE PRINCIPLES OF NORM-FORMATION

Leonid I. Sokolov^{1,2}  , Kirill L. Sokolov³ 

 sokolovli@mail.ru

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State University of Geologic Surveying, Moscow, Russia

²Russian Academy of Architecture and Civil Engineering Research Institute of Construction Physics, Moscow, Russia

³Patrice Lumumba Russian University of Peoples' Friendship, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. The article analyses the norms and actual volumes of water consumption in Russia and abroad with taking into account the growing scarcity of water resources. The structure

© Соколов А.И., Соколов К.Л., 2024

and dynamics of water consumption changing have been studies with Vologda as a study case; conditions of water consumption reduction have been determined. **Methods.** We used the statistical method for analysis of the water consumption data and we used calculation/analytical method for determination of the water consumption norms. Possible water consumption reduction and determination of water losses have been determined with the expert estimation method, as well as with experimental methods in the conditions of exploitation. **Results.** We have proposed the following solutions to the problem: the use of water-saving equipment, taking into account the frequency of use of plumbing equipment in the formation of water consumption norms, and revision of unreasonable norms of specific water consumption. Traditional and modern methods of establishing water consumption standards (calculated, analog and expert) are shown, the structure of water consumption is detailed. The comparison of Russian and foreign methods of establishing water consumption standards is carried out.

Keywords: water consumption rate, methods of norm-formation, specific water consumption, structure of water consumption.

For citation: Sokolov L.I., Sokolov K.L. The population's need for water: the principles of norm-formation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 38–52. DOI:10.35567/19994508-2024-3-38-52.

Received 30.11.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема дефицита пресной воды имеет общемировое значение. Увеличение численности населения в дополнение к развитию различных видов деятельности человека привели к резкой и постоянной нехватке ресурсов пресной воды. В настоящее время дефицит воды испытывает более половины населения планеты. С каждым годом растет неудовлетворенная потребность в этом важнейшем ресурсе жизни. Объем водных ресурсов, пригодных для водоснабжения населения Земли, составляет всего 0,003 %, хотя планета на 70 % покрыта водой. Однако 97 % приходится на соленую воду Мирового океана, 2 % составляют ледники, 0,99 % – подземная вода глубокого залегания. К 2025 г. потребность в воде в сравнении с 2020 г. увеличится в 6,5 раз, а ее стоимость в засушливых районах многократно возрастет.

При обеспечении водоснабжением жилого сектора в мире в целом потребляется почти 8 % мирового расхода пресной воды, причем крайне неравномерно по странам¹. В России нормы и расходы (в среднем около 300 л/сут на человека) воды выше, чем в некоторых европейских странах. Составляющие водопотребления в домашних хозяйствах некоторых стран приведены на рисунке. Анализ водоразбора по отдельным потребителям показывает соотношение по горячей и холодной воде 42 % и 58 % соответственно [1, 2]. Наибольший расход воды в структуре водопотребления приходится на личную гигиену [3].

Величина удельного водопотребления зависит от множества факторов, таких как степень благоустройства, климат, индивидуальное поведение и характер деятельности потребителей, их возраст. В настоящее время нормы водопотребления регламентируются для определения размера оплаты услуг водоснабжения

¹ Study on Water Performance of Buildings. Final Report. European Commission (DG ENV) in association with Cranfield university. Reference: 070307/2008/520703/ETU/D2. June 2009. 161 p.

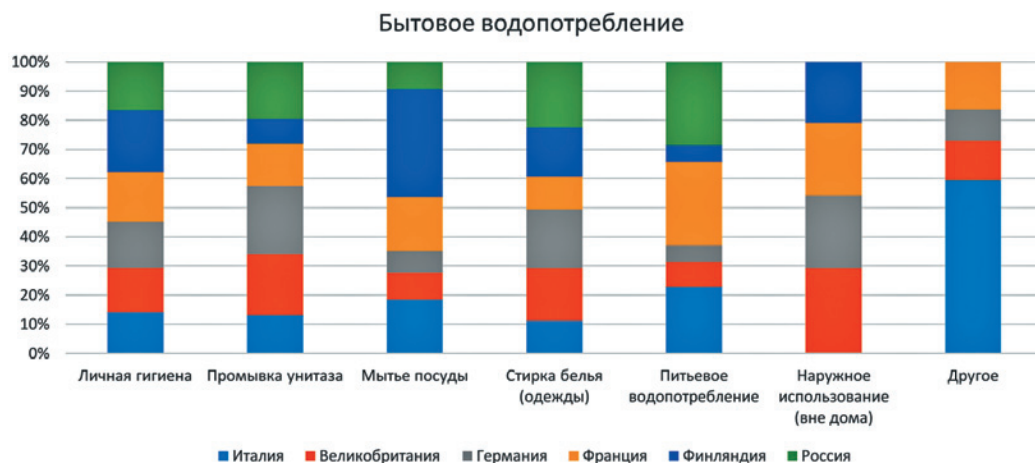


Рисунок. Бытовое водопотребление в ряде государств.
Figure. Domestic water consumption in a number of states.

(постановлениями местных органов власти) и для определения расчетных расходов воды². Все эти нормы, как правило, отличаются друг от друга и не совпадают с эксплуатационным (фактическим) уровнем потребления воды населением.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Здания значительно различаются по функциям, размерам, благоустройству помещений. Например, если жилой дом потребляет 10 м³ воды в сутки, это не значит, что он является ресурсоэффективным и лучшим, чем другой дом, потребляющий 15 м³ воды. Такое сравнение некорректно. Степень благоустройства зданий, срок их эксплуатации, да и количество людей, живущих в каждом из них, могут быть разными [4, 5]. Метрикой индикации эффективности использования воды является удельное водопотребление. Однако типы и функциональная принадлежность зданий различны, поэтому возникла необходимость в их классификации, которая позволит оправдывать выбор релевантных показателей в зависимости от типа оцениваемого здания [6]. Например, в больнице расход воды в день рассчитывают по количеству койко-мест для пациентов и их потребности в воде, учитывают также расходы воды для медицинского персонала и уборки помещений^{3,4}. В школьных столовых учитываются данные по числу условных блюд, при этом устанавливается норма – 12 л/блюдо, приготовленное на сырье и почти в два раза меньше при работе с полуфабрикатами.

² Свод правил СП 30.13330.2020. Актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85*. Внутренний водопровод и канализация зданий. М.: Стандартинформ, 2021. 65 с.

³ Jump up to: Centro Hospitalar de Setúbal EPE and Serviço de Utilização Comum dos Hospitais (SUCH) v. Eurest (Portugal) – Sociedade Europeia de Restaurantes Lda. case C574/12. Published 19 June 2014, accessed 25 January 2021.

⁴ Jump up to: Mengozzi, P., Centro Hospitalar de Setúbal EPE and Serviço de Utilização Comum dos Hospitais (SUCH) v. Eurest (Portugal) – Sociedade Europeia de Restaurantes Lda – Opinion of the Advocate General. Published 27 February 2014, accessed 26 January 2021.

Оценка изменчивости характеристик жилых, коммерческих, производственных и общественных зданий и соответствующих им водопотребителей представляет сложную задачу для проведения полезного сравнения между различными типами зданий. Стандарт BREEAM Великобритании регламентирует водопотребление для восьми различных типов зданий (жилые, образовательные и медицинские учреждения, здания промышленности, торговли, судов и тюрем, офисы). В Австралии Министерство природных ресурсов для горнодобывающей промышленности установило нормы водопотребления: в руководстве по эффективности использования воды для коммерческих и общественных зданий определено 15 типов зданий, включая восемь из английской классификации. Отдельно выделены рестораны, гостиницы, плавательные бассейны, а образовательные учреждения разделены на четыре типа: детский сад, начального, среднего и университетского образования [7]. В США такого рода классификация зависит от штата. Исследование в муниципальном коммунальном хозяйстве Восточного залива (США), район (East Bay Municipal Utility District), показало 20 типов общих предприятий, которые имеют 70 различных видов водоэффективного оборудования и процессов в 14 водных системах категории конечного использования воды. Отдельно регламентируется полиграфическое производство, мойка автомобилей, авторемонт, производство хлеба, напитков и бумаги, промышленные прачечные^{5,6,7,8,9}.

В России же существуют ведомственные нормы водопотребления, закрепленные в сводах правил, в укрупненных нормах по отраслям промышленности и ведомствам жилищно-коммунальной и социальной сфер, которые и принимаются при проектировании систем водоснабжения зданий. Эти нормы называют проектными. Использование проектировщиками данных, приведенных в обновленных СП^{10,11} и научной литературе, не всегда соответствует современным водосберегающим технологиям. Например, в научной

⁵ The World Bank. Mainstreaming Building Energy Efficiency Codes in Developing Countries Global Experiences and Lessons from Early Adopters. Energy Sector Management Assistance Program. 2009. http://www.esmap.org/esmap/sites/esmap.org/files/WP_204_GBL_Mainstreaming%20Building%20Energy%20Efficiency%20Codes%20in%20Developing%20Countries.pdf.

⁶ European Commission. DIRECTIVE 2002/91/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2002 on the energy performance of buildings (EPBD). <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0065:EN:PDF>.

⁷ European Commission. DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (EPBD recast). <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>.

⁸ CA-EPBD. Implementing the Energy Performance of Buildings Directive – Featuring country reports 2010. http://www.epbdca.org/Medias/Downloads/CA_Book_Implementing_the_EPBD_Featuring_Country_Reports_2010.pdf.

⁹ Buildings Performance Institute Europe. Europe's Buildings under the Microscope – a country by country review of the energy performance of buildings, 2011. http://dl.dropbox.com/u/4399528/BPIE/HR_%20CbC_study.pdf.

¹⁰ Свод правил СП 30.13330.2020. Актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85*. Внутренний водопровод и канализация зданий. М.: Стандартинформ, 2021. 65 с.

¹¹ СП 31.13330.2021. Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02–84 (с изменениями № 1, 2). М.: Минрегион России, 2021. 124 с.

литературе приводятся фактические данные, характерные исключительно для конкретных объектов и времени замера. Кроме того, Правила установления и определения нормативов потребления коммунальных услуг¹² устарели и имеют ряд упущений, которые делают определение удельного водопотребления затруднительным. Таким образом, кроме собственно технологических недостатков проектного нормирования, ныне действующие принципы нормоформирования характеризуются определенной функционально-целевой недостаточностью и системной незавершенностью. Использование единых нормативов для взаиморасчетов за потребляемую воду не соответствует реальному водопотреблению, т. к. нормы не могут ни при каких условиях заменить приборы учета.

Потребление воды населением и другими абонентами отличается неравномерностью, меняется в течение времени (часа, суток, месяца), зависит от многих факторов (степени благоустройства здания, возраста проживающих, времени года и т. д.), поэтому никакой норматив не способен зафиксировать эти изменения и адекватно их оценить [8, 9]. Можно только с определенной долей вероятности принять такой норматив, который был бы равноценен средне-взвешенной величине фактического удельного расхода. В настоящее время методологическая база, позволяющая оценить и обосновать величину нормы потребления воды населением, несовершенна. По этой причине в разных городах России для жилых зданий одинаковой степени и уровня благоустройства существуют разные нормативы, разброс значений достигает 1,5–2 раз [10]. В 1980-е годы разработаны «Методические рекомендации по установлению эксплуатационных норм водопотребления населением», которые стали широко использоваться организациями водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) как при обосновании норм водопотребления в жилищном фонде, так и для оценки размера утечек воды из внутридомовых систем¹³.

Величины удельного водопотребления, вычисляемые для действующих водопроводов, принято называть эксплуатационными нормами водопотребления. Величины же удельных расходов, рассчитанные по показаниям квартирных или домовых водомеров, назовем фактическими эксплуатационными нормами водопотребления (фактическим удельным водопотреблением). Следует иметь в виду, что в СП¹¹ заложен удельный расход (расчетное среднесуточное водопотребление на одного жителя) не только на хозяйственно-питьевые нужды, но и на обеспечение водой всей инфраструктуры, которая обслуживает население. Такое положение приводит к тому, что уже на стадии проектирования закладывается заведомо несоответствующий реалиям норматив в снабжении водой потребителей, что нерационально с точки зрения экономии водных ресурсов. В Постановлении Правительства РФ № 306 «Об утверждении

¹² Постановление Правительства РФ от 23 мая 2006 г. № 306 «Об утверждении Правил установления и определения нормативов потребления коммунальных услуг и нормативов потребления коммунальных ресурсов в целях содержания общего имущества в многоквартирном доме» (с изменениями и дополнениями). М., 2006.

¹³ Методические рекомендации по установлению эксплуатационных норм водопотребления. Дата введ. 01.10.1981, дата актуализации 17.06.2011. МЖКХ РСФСР. М., 1981.

Правил установления и определения нормативов потребления коммунальных услуг и нормативов потребления коммунальных ресурсов в целях содержания общего имущества в многоквартирном доме» приведены три метода установления нормативов водопотребления – расчетный, аналогов и экспертный.

В структуре нормативов водопотребления необходимо учитывать не только социальную и хозяйственно-гигиеническую потребности в воде, но и утечки воды, в т. ч. из-за неисправных сантехнических приборов, нерациональные расходы, а также расходы на увеличение давления в системе для обеспечения бесперебойности водоснабжения (повышенные сверхнормативные напоры во внутримногоквартирной сети, например, из-за отсутствия регуляторов давления). Обоснование и нормирование неучтенных расходов воды систем водоснабжения, влияющих на себестоимость, также проблематично. Неучтенные расходы – это разность между объемом воды, забираемой водозаборными сооружениями, и объемом воды, полученной абонентами-потребителями. Показатель «неучтенные расходы» включается в состав затрат калькуляции по себестоимости и учитывается при формировании тарифов на услуги по водоснабжению. Общий расход воды, подаваемой в город, состоит из объема реализованной воды и ее потерь от точки водозабора до потребителей. В жилых зданиях все потери воды условно подразделяются на следующие виды: утечки, нерациональные расходы, сливы.

Уточнение структуры водопотребления позволяет выявить резерв – разность между фактическим и идеальным водопотреблением, представляющим потребность человека в воде при оптимальном воздействии на организм физиологических факторов. Для полной реализации резерва необходимо создание идеальных условий в системе, что требует значительных материальных затрат и на существующем техническом уровне невозможно. Поэтому резерв следует признать чисто теоретической величиной. Но это не снижает его важности его определения, т. к. резерв позволяет выявить степень нерациональности расходования воды, определить возможности ее экономии и разработать стратегию борьбы с потерями.

Климат можно отнести к фактору, влияющему в некоторой степени на определение объемов водопотребления на долгосрочный период. С повышением среднегодовой температуры повышается и потребность в воде. Разработка эффективной методики, охватывающей общее водопотребление и оценивающей эксплуатационные параметры, связанные исключительно с физическими характеристиками здания, не представляется возможной, т.к. индивидуальное поведение потребителей воды непостоянно. К тому же, очевидна вариабельность потребления отдельных лиц в пределах измеряемого здания, а также установленного в квартирах разного по эффективности сантехнического оборудования. Это означает, что потребление воды в здании зависит не только от его физических характеристик, установленных сантехнических приборов, но и в значительной мере от индивидуального поведения его обитателей. На величину водопотребления в жилом секторе влияют также степень благоустройства, уровень санитарной гигиены и общей культуры населения, наличие и характер местных водоемов для

рекреации, заселенность квартир, наличие мини-сада, цветников на балконах и под окнами на придомовой территории, наличие домашних животных и рыб, а также характер профессиональной деятельности его жителей (например, металлургам, строителям нужно значительно больше воды для мойки и стирки, чем представителям других профессий). Таким образом, потребности в воде определяются жизненными стандартами и привычками населения. Повышение уровня комфорта влечет за собой и увеличение расхода потребляемой воды. Этот подъем в водопотреблении может быть ограничен лишь общественным сознанием, нацеленным на экономию воды, применением водосберегающей сантехники или же чисто экономическими методами. Формирование экономной индивидуальной модели поведения водопотребителей является важным направлением снижения потребления воды [11].

Среди технически развитых стран Россия является рекордсменом по душевому водопотреблению. Цена за 1 м³ воды в Москве достигла 0,8\$ в то время, как еще 10 лет назад она составляла 0,1\$. Хотя следует признать, что по сравнению с другими странами это значительно ниже: в США – 2,1\$, Дании – 3,4\$, Германии – 1,6\$ за 1 м³ воды. Полезное водопотребление в российских домохозяйствах составляет 75 %, на утечки приходится 7 %, а на нерациональное водопользование – 18 %. В целом по России переход жителей на приборный и поквартирный учет водопотребления показал снижение фактического потребления воды по отношению к расчетному в 1,5–2 раза.

Цель проведенного исследования – определение величин удельного водопотребления населением на примере города Вологды, исследование структуры и динамики его изменения, определение условий снижения уровня водопотребления.

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – сфера жилищно-коммунального хозяйства, связанная с обеспечением населения питьевой водой. В качестве методологической базы использованы: статистический метод – при анализе данных о водопотреблении; расчетно-аналитический – для определения норм потребления воды; метод экспертных оценок – при расчете возможного снижения водопотребления и определении размера потерь воды; а также анализ нормативно-технической документации, и экспериментальные методы исследований. При выполнении поставленной задачи уточнена структура водопотребления, выявлены резервы водосбережения в частных домовладениях и многоквартирных домах г. Вологды.

Вологда относится ко II климатической зоне (умеренно континентальный климат), в городе проживает 320 тыс. жителей. При обследовании домов были выбраны здания разного уровня благоустройства (по 15 зданий двух видов благоустройства, каждый вид с аналогичными конструктивными и техническими параметрами, степенью благоустройства), с различными нормами водопотребления и водоотведения. К обследованию также привлекались частные домовладения с установленными водомерами, а также ряд двух-, пяти-, девятиэтажных зданий с общедомовыми водомерами. Объем выборки

определяли на основе предварительной выборки в два этапа: на первом этапе производился предварительный отбор жилых домов с оценкой дисперсии выборочной совокупности; на втором определялась дисперсия генеральной совокупности. Количество измерений соответствовало условиям представительности выборки (не менее 15 однотипных домов).

В домах каждого вида благоустройства определяли удельное водопотребление на одного человека в сутки и устанавливали среднеарифметические значения удельного водопотребления. Суммировались значения удельного водопотребления, полученные в измерениях, проведенных в разное время года, и рассчитывалось его среднее арифметическое значение для данного вида благоустройства жилья (номенклатуры разновидностей норм водопотребления). Исследования проводили в зданиях основных видов благоустройства: здания с водопроводом, канализацией, оборудованные ванными, с газовыми водонагревателями; здания с водопроводом и канализацией, оборудованные ванными, с централизованным горячим водоснабжением. Выборочные приборные измерения фактического водопотребления населением проводились с учетом следующих положений:

- приборные измерения осуществлялись поверенными в установленном порядке средствами измерительной техники;

- измерениями были охвачены дома каждого вида благоустройства (разновидности норм водопотребления, которые определены обследованием жилого фонда г. Вологды);

- для проведения приборных измерений отобраны дома в разных районах города (с разной удаленностью от главных водопроводных насосных станций). Увеличение количества отобранных для обследования зданий повышает статистическую достоверность результатов;

- перед началом приборных измерений были устранены все утечки воды из внутридомовых сетей;

- измерения выполняли в разные периоды водопотребления (лето, зима, периоды отсутствия подачи горячей воды);

- при наличии в доме квартир, оборудованных водосчетчиками, количество потребленной воды определялось по их показаниям.

При анализе эффективности использования воды в зданиях в проведенном эксперименте:

- исследована структура водопотребления с целью уточнения в зависимости от степени благоустройства, сезонности и климата, заселенности квартиры, характера деятельности и индивидуального поведения водопотребителей;

- на основе реальных замеров расходов воды по приборам учета в зданиях с разной степенью благоустройства определено значение удельного водопотребления по месяцам и его сравнение с нормативами;

- проанализированы факторы влияния на значения удельного водопотребления: повышение свободного напора в сети, техническое состояние санприборов, температура горячей воды, наличие квартирных регуляторов и ограничителей расхода воды, уровень культуры водопользования;

– определены резервы водосбережения с учетом применения разных видов водо-и энергосберегающего оборудования;

– изучены здания с централизованным горячим водоснабжением после осуществления в них комплекса водосберегающих мероприятий: устранение утечек воды, оптимальный температурный режим в системах горячего водоснабжения, частотное регулирование приводов насосов на вводе, установка регуляторов расхода воды на смесительной арматуре и водосчетчиков на холодной и горячей линиях водоснабжения в каждой квартире;

– проанализирована возможность использования методики BREEAM water, разработанной британской компанией BRE Global, на основе расчетов частоты использования санитарно-технических приборов для формирования нормы водопотребления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты проведенной работы представлены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1. Исследование структуры водопотребления

в хозяйственно-питьевом водоснабжении г. Вологды

Table 1. Study of the structure of water consumption in the drinking water supply of Vologda

Процедура	Потребность в воде, л/(сут/чел.)	
	Хозяйственно-питьевая и гигиеническая	Социальная с учетом жизненного стандарта и привычек
Физиологический минимум		
Питьевые нужды	2,0	3,0
Приготовление пищи	3,4	4,6
Всего	5,4	7,6
Социальная потребность		
Мытье посуды	8,7	10,7
Стирка	13,6	19,2
Уборка (мытьё полов)	5,0	5,8
Полив цветов	0,2	0,3
Всего	27,5	36,0
Гигиеническая потребность		
Умывание, чистка зубов, бритье	7,0	11,0
Душ, ванна	15,7	26,6
Смывной бачок	20,7	31,4
Всего	43,4	69,0
Итого	76,3	112,6

Примечание: * – потери воды через неисправный (капающий) двухрычажный кран составили в сутки 1,4 л.

Подсчитав среднюю повторяемость указанных в таблице операций на протяжении суток и недели, можно прийти к выводу, что минимальная норма водоснабжения только для удовлетворения питьевых и санитарно-бытовых потребностей человека должна быть не менее 150 л/сут (по опросам жителей и индивидуальным замерам при малой выборке). Если учесть все другие по-

требности и даже принять во внимание высокий уровень санитарного благоустройства, следует признать завышенной удельную норму водопотребления в городах 350–600 л/сут, в сельской местности – 150 л/сут на 1 жителя.

Исследование, проведенное в Вологде по обоснованию удельной нормы водопотребления, подтверждает неоднозначность этих выводов и необходимость учета многих факторов, включая климатические особенности городской территории. Определено, что установка водосчетчиков на вводе водопровода в здание практически не влияет на экономию воды в целом. Для снижения водопотребления необходимо устанавливать счетчики воды непосредственно в квартирах. Как показали результаты исследования, установка квартирных счетчиков, позволила снизить плату за воду по квартирам в среднем на 30 %.

Таблица 2. Установленные значения удельного водопотребления в сравнении с действующим нормативом

Table 2. Established values of specific water consumption in comparison with the current standard

Вид исследования	Общее удельное водопотребление, м ³ /мес. на 1 чел.	Холодное водоснабжение, м ³ /мес. на 1 чел.	Горячее водоснабжение (на подогрев), м ³ /мес. на 1 чел.
Действующий норматив	8,208	4,712	3,496
Экспериментальные данные	5,89	4,25	1,64
Расчетный метод	12,460	10,384	2,076
Метод аналогов	4,83	4,83	–

Как видим, данные табл. 1 и табл. 2 не коррелируются, т. к. табл. 1 составлена из расчета минимальных водопотребностей человека (по опросам жителей и индивидуальным замерам при небольшом объеме выборки, без учета утечек и потерь), а данные табл. 2 демонстрируют реальные замеры расходов воды по приборам учета. Кроме того, определена температура стоков в разные периоды года. Температура канализационных стоков формируется смешением горячей (норматив +65 °С) и холодной воды (5 –7 °С зимой и 12 –15 °С летом). Среднее соотношение потребляемой горячей и холодной воды в стоках составило, соответственно, 27–30 % и 70–73 %.

Экспериментально установлено, что на удельное водопотребление влияют:

- величина свободного напора перед водоразборной арматурой (так, увеличение напора на 10 м вод. ст. приводит к повышению водопотребления на 10–15 %);
- техническое состояние санитарно-технической водоразборной арматуры, особенно арматуры сливных бачков и связанный с этим уровень утечек, который может достигать 70 % от подачи воды в дом;
- типы и емкость смывных бачков, типы душа и водоразборной арматуры (так, емкость смывного бачка может быть от 8 до 16 л, что определяет колебания полезного расхода воды на смыв унитаза на одного человека в сутки от 40 до 80 л);
- температура горячей воды и ее охлаждение в трубопроводах от водонагревателя до потребителя (при недостаточной температуре горячей воды

население будет сливать ее до более теплой, а при длительных остановках и неработающей системе циркуляции вода в трубопроводах будет значительно охлаждаться, что может привести к значительному повышению водопотребления);

– культура водопользования и привычка к экономному расходованию воды (у части населения России нет навыков экономного расходования воды, существует привычка все делать под струей воды, что в несколько раз повышает ее расход на бытовые цели);

– поквартирный учет холодной и горячей воды: при установке квартирных счетчиков расход воды уменьшается на 30–35 %;

– величина тарифа на воду и ее подогрев (при повышении тарифов жители становятся более экономными);

– наличие квартирных регуляторов и ограничителей расхода воды, специальной водоразборной арматуры (смесителей с термостатами, которые обеспечивают заданную температуру сразу же после пуска воды, порционной арматуры и т. п.);

– наличие у населения современных стиральных и посудомоечных машин.

Частота использования сантехнических приборов при формировании нормы водопотребления в России не учитывается. Расчет норм водопотребления в европейских странах проводится с использованием методики BREEAM water. В проведенном эксперименте данные о частоте потребления воды отсутствовали, поэтому принимались доступные, фиксированные значения, установленные для унитаза (1,3 раза пользования в день на человека при 6 л на один смыв), для смесителей и кранов (2,5 раза на 12 л/мин) и душевых кабин (0,1 на 14 л/мин).

При оценке системы водоснабжения здания проектировщик может определить и ввести в расчет водопотребления количество и эффективность реальных санитарных приборов. Для этого он умножает заданную эффективность (подачу) прибора на частоту использования и получает общее водопотребление. Частота использования санприборов является заранее определенным допущением, что позволяет сохранить возможность непосредственного сравнения уровней потребления воды между зданиями, оснащенными разной сантехнической арматурой.

По результатам исследований (табл. 2) можно также сделать вывод о несовершенстве методов обоснования нормативов, применение которых приводит к погрешностям и ошибкам, а значит пересчет существующих нормативов по ним не дает однозначной оценки и может привести к ухудшению финансово-экономического положения предприятий ВКХ и собственно потребителей, т.к. норма не отражает реальной картины водопотребления. Расчетный метод в том виде, в котором он приведен в Правилах¹¹, сложно применить на практике. В его основе приняты расчетные расходы санитарно-технических приборов из СП 30.13330.2016, предназначенные для определения диаметров подводящих коммуникаций к санитарно-техническим приборам. Кроме того, в Правилах не указано количество водных процедур, принимаемых человеком в единицу времени, частота включения приборов, поэтому определить норматив этим методом затруднительно.

В основу методов аналогов и экспертного взяты формулы определения предельных временных эксплуатационных норм (ЭВН) из вышеупомянутых «Методических рекомендаций...»¹³. Указанные формулы, в первую очередь, предназначены для определения критерия рациональности потребления воды в жилых зданиях, который служит основой для разработки мероприятий по сокращению утечек во внутридомовых системах и снижению нерационального потребления воды населением. По этим формулам рассчитываются чисто гипотетические величины удельных расходов (если бы все утечки внутри дома были ликвидированы). Использование теоретической величины удельного расхода в качестве показателя для взаиморасчетов с абонентами приведет еще к большим финансовым потерям предприятий ВКХ. Кроме того, неиспользуемая чистая вода в виде утечек сливается в систему водоотведения города, где ее несколько раз перекачивают, прежде чем она попадает на канализационные очистные сооружения, что также увеличивает финансовые и энергетические затраты предприятий.

Такое положение будет продолжаться до тех пор, пока повсеместно не будет установлен приборный учет воды в квартирах и на вводах водопровода в здания, а это прямая обязанность управляющих компаний по обслуживанию жилого фонда, а не ресурсоснабжающих организаций. Единственно разумным путем сокращения непроизводительных расходов воды и прямых утечек является повсеместный учет воды у абонентов, на основе реального потребления должны быть рассчитаны экономически обоснованные тарифы. Только объективный учет и реальная цена за воду заставит население разумно ее расходовать. Таким образом, на уровень удельного водопотребления населением воды влияют многочисленные факторы, которые однозначно учесть весьма затруднительно.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования для выявления уровня реального водопотребления проведено обследование 357 квартир зданий разной степени благоустройства, в которых проживают 994 жителя г. Вологды. Установлен суммарный расход воды на одного человека с учетом физиологического минимума, социальной и гигиенической потребностей при постоянной подаче воды. Для Вологды это значение составляет 196 л/сут.

Определено, что для жилых зданий одинаковой степени и уровня благоустройства установленные нормативы завышены в 1,4–1,7 раза. На основе анализа норм потребления воды, эффективности методов снижения водопотребления и размера утечек определено, что в Вологде возможно снижение водопотребления на величину до 25 % от существующего с доведением уровня удельного водопотребления до 140–160 л/сут на одного человека.

В результате математико-статистической обработки данных исследования доказано, что дифференциальное распределение удельных расходов воды соответствует нормальному закону распределения при ее круглосуточной подаче. Среднее удельное водопотребление для зданий с водопроводом, канализа-

цией и ваннами с газовыми водонагревателями составило 166 л/(сут·чел.); для зданий с водопроводом, канализацией и ваннами с централизованным горячим водоснабжением – 200 л/(сут·чел.). Установлено, что размер удельного водопотребления в жилых домах, оборудованных водонагревателями, меньше установленного норматива на 9,8 %; в домах с централизованным снабжением горячей водой меньше норматива на 21,1 %, что говорит о завышении нормативов. Удельная подача квартальных насосных станций выше норматива на 23,4 % и гораздо выше реального водопотребления, что свидетельствует о наличии значительных потерь воды.

Установлено, что увеличение численности семьи приводит к снижению удельного водопотребления: при составе семьи из четырех человек удельное водопотребление практически в 2,4–3 раза меньше, чем на одного человека. Расчеты показали следующие ориентировочные расходы воды, используемой в хозяйстве семьей из четырех человек: кухня 14–23 л/мин; душ 5–10 л/мин; ванна 230 л/сут; туалет 23–32 л/сут; мытье посуды 68–90 л/сут; стирка (1 раз) 159 л/ед.; потери по причине неисправного крана (капающий) – 500 л/год.

На основании данных исследования определены потери воды из внутридомовой сети в целом в размере 10–15 % от общего объема поданной в здание воды. В результате эксперимента установлено, что на удельное водопотребление влияют: величина свободного напора; техническое состояние водоразборной арматуры; типы и емкость смывных бачков унитазов, типы душей и водоразборной арматуры; температура горячей воды и ее охлаждение в трубопроводах; культура водопользования; наличие поквартирного учета; величина тарифа на воду; наличие квартирных регуляторов и ограничителей расхода воды; наличие стиральных и посудомоечных машин. Ключевыми элементами подхода к рациональному использованию воды в здании является использование водосберегающего оборудования.

Показано, что установка водосчетчиков на входе дома практически не влияет на экономию воды, но необходима для учета расхода воды на общедомовые нужды. Для снижения водопотребления счетчики воды необходимо устанавливать в квартирах. Учет воды должен быть поквартирным, поскольку именно в этом случае начинают работать психологические факторы. Так, в Вологде после массовой установки квартирных счетчиков воды за 10 лет подача воды в город уменьшилась на 27–30 %. Объем воды, определенный по показаниям общедомовых приборов учета (за вычетом объема воды на общедомовые нужды, объема воды, используемого субабонентами, и объема воды, определенного по квартирным приборам учета), должен распределяться между квартирами, не имеющими приборов учета, пропорционально количеству жильцов.

Формирование реальных норм водопотребления имеет социальное и экономическое значение. Установление фактических величин потребления питьевой воды населением с учетом физиологического минимума, социальной и гигиенической потребностей позволяет на практике обосновать нормы водопотребления для городов и поселков, установить размер платы за водоснабжение, планировать водоснабжающим предприятиям объемы реализации воды,

а также прогнозировать доходы и расходы. От величины норм водопотребления зависят не только затраты на эксплуатацию систем водоснабжения, но и в значительной степени надежность и качество водообеспечения населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хатанбаатарын А. Усовершенствование методики нормирования водопотребления населением в крупных городах Монголии: автореф. дис... канд. техн. наук. Новосибирск, 2004. 189 с.
2. Тауфик М.Ю. Обоснование нормативов водопотребления в жилищном фонде стран Ближнего Востока (на примере Палестины): автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: РУДН, 2000. 16 с.
3. Бродач М.М. Водоснабжение жилых зданий – проблема учета и расчетов // Сантехника. 2004. № 1. С. 7–9.
4. Соколов Л.И. Инженерные системы высотных и большепролетных зданий и сооружений. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 604 с.
5. Бекулов Г.Т. Экономия воды в быту // Старт в науке. 2020. № 1. Режим доступа: <https://science-start.ru/ru/article/view?id=1836>.
6. Соколов Л.И. Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения и предоставление коммунальных услуг в многоквартирном доме: спр. пособие. Вологда: ВоГТУ, 2010. 80 с.
7. Koech R. Improving Irrigation Water Use Efficiency: A Review of Advances, Challenges and Opportunities in the Australian Context / R. Koech, P. Langat // *Water*. 2018. № 10. P. 1771.
8. Черносвитов М.Д. Динамика режимов и величин удельного водопотребления населением города: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара: 2011. 213 с.
9. Тауфик М.Ю., Свинцов А.П. Влияние заселенности на величину водопотребления в жилых зданиях // Жилищное строительство. 2000. № 10. С. 9–11.
10. Лернер А.Д. О рациональном расходовании питьевой воды населением // Водоснабжение и сантехника. 2007. № 6. Ч. 2. С. 46–48.
11. Свинцов, А.П. Мотивация как фактор управления процессом водопотребления // Жилищное строительство. 2001. № 7. С. 20–21.

REFERENCES

1. Khatanbaataryn A. Upgrading of the methods of population's water consumption norm-formation in major cities of Mongolia: abstract of the technical sciences doctoral thesis. Novosibirsk, 2004. 189 p. (In Russ.).
2. Taufik M.Y. Substantiation of the water consumption norms in the Middle East countries housing (Palestine as a study case): abstract of the technical sciences doctoral thesis. M.: RUDN. 2000. 16 p. (In Russ.).
3. Brodych M.M. Water supply of housing: problem of accounting and calculations. *Sanitary engineering*. 2004. No. 1. P. 7–9 (In Russ.).
4. Sokolov L.I. Engineering systems of high-rising and large-span buildings and facilities. M.; Vologda: Infra-Inzheneria, 2019. 604 p. (In Russ.).
5. Bekulov G.T. Water-saving in domestic life. *Start v nauke [Start-up in science]*. 2020. No. 1. Access regime: <https://science-start.ru/ru/article/view?id=1836> (In Russ.).
6. Sokolov L.I. Water supply and disposal systems' use and public utilities rendering in a multifamily housing: reference book. Vologda: VoGTU, 2010. 80 p. (In Russ.).
7. Koech R. Improving Irrigation Water Use Efficiency: A Review of Advances, Challenges and Opportunities in the Australian Context. R. Koech, P. Langat. *Water*. 2018. No. 10. P. 1771 (In Russ.).
8. Chernosvitov M.D. Dynamics of urban population specific water consumption regimes and values: abstract of the technical sciences candidate thesis. Samara: 2011. 213 p. (In Russ.).
9. Taufik M.Y., Svintsov A.P. Влияние заселенности на величину водопотребления в жилых зданиях. *Housing construction*. 2000. No. 10. P. 9–11 (In Russ.).
10. Lerner A.D. About drinking water public rational consumption. *Water supply and sanitary engineering*. 2007. No. 6. Part 2. P. 46–48 (In Russ.).
11. Svintsov A.P. Motivation as a factor of water consumption control. *Housing construction*. 2001. No. 7. P. 20–21 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Соколов Леонид Иванович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Россия, Москва, Локомотивный проезд, д. 21; профессор, кафедра строительство систем и сооружений водоснабжения и водоотведения, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 117485, Россия, Москва ул. Миклухо-Маклая, 23; SPIN-код: 3010-5480, ORCID: 0000-0001-9635-8389, Scopus:55891692500; e-mail: sokolovli@mail.ru

Соколов Кирилл Леонидович, магистрант, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, 117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; SPIN-код: 1910-9370, ORCID: 0009-0005-5983-1356, Scopus 57222428148; e-mail: kirill-sokolov2015@mail.ru

About the authors:

Leonid I. Sokolov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Russian Academy of Architecture and Civil Engineering Research Institute of Construction Physics, Lokomotivnyy proyezd, 21, Moscow, 127238, Russia; Sergo Ordzhonikidze Russian State University of Geologic Surveying Chair of water supply and disposal systems/facilities construction, ul. Miklukho-Maklay, 23, Moscow, 117485, Russia; SPIN-code: 3010-5480, ORCID: 0000-0001-9635-8389, Scopus:55891692500; e-mail: sokolovli@mail.ru

Kirill L. Sokolov, Post-graduate, Patrice Lumumba Russian University of Peoples' Friendship, ul. Miklukho-Maklay, 6, Moscow, 117198, Russia; SPIN-code: 1910-9370, ORCID: 0009-0005-5983-1356, Scopus 57222428148; e-mail: kirillsokolov2015@mail.ru

Основные тенденции изменения естественных и антропогенных факторов и геоэкологические последствия высыхания Аральского моря

А.М. Гареев¹ ✉, С. Н. Азимова², С.У. Уролов¹

✉ aufar.gareev@mail.ru

¹ Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

² Джизакский государственный педагогический университет, г. Джизак, Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Высыхание Аральского моря, которое наблюдается с начала 1960–х годов по настоящее время, привело к возникновению ряда неблагоприятных хозяйственно-экономических и экологических последствий в Центральной Азии. Оно было вызвано совокупностью естественных и антропогенных факторов, влияющих на формирование процессов резкого снижения речного стока в пределах среднего и нижнего течений рек Амударья и Сырдарья и проявилось в виде обширного пространства высохшего дна моря с характерными признаками формирования новых ландшафтов. Различия в условиях формирования речного стока и использования водных ресурсов в пределах верхней, средней и нижней частей бассейнов указанных рек требуют изучения особенностей изменения характеристик водопользования, выявления закономерностей, обусловивших высыхание моря, и обоснования оптимальных направлений и параметров природопользования в пределах вновь сформировавшихся территорий. **Методы.** Применены статистические, графические и картографические методы анализа многолетней гидрометеорологической информации и данных водопользования, полевых изысканий и наблюдений. **Результаты.** На основании всестороннего анализа исходной информации установлено, что для бассейна Аральского моря в многолетнем разрезе характерна заметная изменчивость гидрометеорологических условий, что является проявлением совокупности естественных факторов, способствующих изменениям его морфометрических характеристик, гидрологического режима и экологических условий. В соответствии с влиянием этих факторов сформировалась тенденция быстрого усыхания Аральского моря, возникли негативные последствия, характерные как для высохшего ложа самого моря, так и прилегающих территорий. На основании данных полевых изысканий и наблюдений охарактеризованы вновь сформировавшиеся ландшафты, изучены сукцессионные процессы, выполнены прогнозные оценки происходящих изменений. Сформированы предложения по возможности проведения мелиоративных работ в пределах образовавшихся солончаков, что имеет большое научное и практическое значение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бассейн, Аральское море, антропогенные, факторы, высыхание, ландшафты, сукцессия, геоэкологические условия, мелиорация.

Для цитирования: Гареев А.М., Азимова С.Н., Уролов С.У. Основные тенденции изменения естественных и антропогенных факторов и геоэкологические последствия высыхания Аральского моря // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 53–67. DOI:10.35567/19994508-2024-3-53-67.

Дата поступления 06.03.2024.

© Гареев А.М., Азимова С.Н., Уролов С.У., 2024

THE MAIN CHANGE TRENDS IN NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS RESPONSIBLE FOR THE ARAL SEA DESICCATION AND ITS GEO-ECOLOGICAL CONSEQUENCES

Aufar M. Gareev¹ ✉, Sayera N. Azimova², Sardor U.Urolov¹

✉ aufar.gareev@vail.ru

¹ Ufa University of Science and Technology (UUNiT), Ufa, Russia

² Jizzak State Pedagogical University, Jizzak, Uzbekistan

ABSTRACT

Relevance. The drying up of the Aral Sea, which has been observed since the early 60s of the twentieth century up to the present time, has led to the emergence of a number of unfavorable economic and ecological consequences within Central Asia. It occurred depending on the influence of a large set of natural and anthropogenic factors involved in the formation of the processes of sharp decrease in river flow within the middle and lower reaches of the Amu Darya and Syr Darya rivers, respectively, manifested in the form of a vast area of dried up sea bed with characteristic signs of formation of new landscapes. In turn, the existing differences in the conditions of river flow formation and water resources use within the upper, middle and lower parts of the above-mentioned river basins require the need to study the peculiarities of changes in the characteristics of water use, to identify the regularities that caused the drying up of the sea, respectively, to justify the optimal directions and parameters of nature management within the newly formed areas. **Methods.** Statistical, graphic and cartographic methods of analyses of long-term hydrometeorological information and water use; field surveys and observations were applied. **Results.** Based on a comprehensive analysis of the initial information, it was revealed that the Aral Sea basin is characterized by a marked variability of hydrometeorological conditions over many years, which is a manifestation of a set of natural factors contributing to changes in its morphometric characteristics, hydrological regime and environmental conditions. As part of the main factors influencing the characteristics of the water balance for the sea itself, the long-term dynamics of river runoff change within the upper part of its basin (in the upper reaches of the Amu Darya and Syr Darya rivers) has been studied, which reflects the presence of a tendency of its increase in time with the presence of variability due to characteristic cyclic fluctuations. As part of anthropogenic factors, it should be noted that water withdrawal rates for irrigation of cultivated crops (cotton, etc.) have increased significantly over vast areas within the studied sea basin from the 1960s to the present time. This was the reason that irretrievable losses within the heavily developed areas of the middle and lower reaches of the Amu Darya and Syr Darya rivers have become many times higher than the values of river runoff from upstream parts of the above-mentioned river basins, as well as lateral inflow. In accordance with the influence of these factors, a tendency of rather rapid desiccation of the Aral Sea was formed, and negative consequences characteristic of both the dried bed of the sea itself and the adjacent territories emerged. On the basis of field surveys and observations, the newly formed landscapes were characterized, succession processes were studied, which allowed to carry out forecast assessments of the ongoing changes; proposals with analysis of the possibility of reclamation within the formed solonchaks were recommended, which is of great scientific and practical importance.

Keywords: basin, the Aral Sea, natural, anthropogenic, factors, drying, landscapes, succession, geo-ecological conditions, solonchaks salt-marsh, reclamation.

For citation: Gareev A.M., Azimova S.N., Urolov S. U. The main change trends in natural and anthropogenic factors responsible for the Aral Sea desiccation and its geo-ecological consequences. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 53–67. DOI:10.35567/19994508-2024-3-53-67.

Received 06.03.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Произошедшие изменения, характеризующиеся ускоренными процессами высыхания Аральского моря и возникновением чрезвычайных экологических и экономических последствий, имеют международный резонанс. Трагедия Аральского моря, в принципе, представляет собой крупнейшую экологическую катастрофу в новейшей истории, которую пережили более 60 млн жителей стран Центральной Азии. По своим климатическим, экологическим, гуманитарным и социально-экономическим последствиям она отражает связь экологических проблем со стратегической безопасностью государств, расположенных в пределах бассейна Аральского моря.

Изучение проблем Арала нашло отражение в значительном количестве научных работ гидрологического, экологического, водохозяйственного и экономического профиля [1–6]. Основное внимание было уделено вопросам исследования динамики водопользования в бассейнах рек Амударья и Сырдарья, формирования безвозвратных потерь, снижения речного стока и изменения гидрохимических характеристик вод в реках.

Однако до сих пор остаются слабо изученными закономерности, отражающие оценку значимости водных ресурсов, формирующихся в верховьях указанных рек, в поддержании морфометрических характеристик Аральского моря, а также происходящих изменений его ложа после высыхания. С учетом изложенного в данной работе значительное внимание уделено анализу многолетней динамики изменения речного стока, особенностей водопользования в пределах различных частей бассейнов рек Амударья и Сырдарья.

На основании обобщения материалов предшествующих исследований, а также собственных изысканий и наблюдений выявлены закономерности, характеризующие происходящие изменения в пределах высохшего ложа Аральского моря, рекомендованы мероприятия, направленные на минимизацию масштабов проявления негативных экологических и хозяйственно-экономических последствий.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются Аральское (бывшее) море и его бассейн, характеризующиеся различными условиями формирования водных ресурсов, их использования в пределах верхних, средних и нижних участков, а также изменением ложа, освободившегося от морской воды в течение последних десятилетий.

В качестве исходной информации использованы материалы многолетних гидрометеорологических наблюдений по постам и станциям Узгидромета, фондовые материалы институтов, управлений и ведомств водохозяйственного профиля, расположенных в пределах бассейнов рек Амударья и Сырдарья, информация из опубликованных источников, а также материалы, полученные в ходе проведения комплексной экспедиции в 2023 г.

После сбора и обобщения исходной информации выполнен ее статистический, графический и картографический анализ, выявлены имеющиеся за-

кономерности, а также проведено научно-методическое обоснование предложенных рекомендаций и мероприятий, направленных на минимизацию масштабов проявления негативных экологических и экономических последствий высыхания Аральского моря.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании всестороннего анализа исходной информации установлено, что по бассейну Аральского моря в многолетнем разрезе проявляется заметная изменчивость гидрометеорологических условий, это является причиной, способствующей изменениям его морфометрических характеристик, гидрологического режима и экологических условий.

Особенности изменения климатических условий, формирования пространственной и временной изменчивости речного стока, а также качества воды в реках Амударья и Сырдарья, относящихся к Аральскому бассейну, освещены в значительном количестве опубликованных работ [1, 7–11]. Многие исследования посвящены изучению особенностей формирования и проявления в течение последних десятилетий водохозяйственных, социально-экономических и экологических проблем [3, 4, 6, 12–15]. На основании обобщения этих материалов можно отметить, что до начала 1960-х годов приток речных вод к Аральскому морю и его режим сохранялись относительно стабильными. Колебания уровня Аральского моря и изменение его морфометрических характеристик были связаны, прежде всего, с меняющимися соотношениями приходных и расходных составляющих водохозяйственного баланса. В дальнейшем в связи с интенсивным освоением новых орошаемых земель преимущественно в пределах средней и нижней частей бассейнов рек Амударья и Сырдарья и резким увеличением водозаборов для целей ирригации произошло сокращение поступления речного стока. В результате многократного увеличения безвозвратных потерь стока указанных рек начался процесс интенсивного снижения уровня, многократного уменьшения объема воды в Аральском море, которые продолжаются по настоящее время. В свою очередь, формирование на больших площадях негативных хозяйственно-экономических и экологических изменений обусловило необходимость выполнения ряда исследований, направленных на изучение особенностей новых ландшафтных образований, засоления почв, сукцессионных процессов и др.¹ [3, 17–20].

С учетом изложенного в ходе выполнения данного исследования основное внимание уделялось изучению характеристик изменения речного стока в верхних частях бассейнов рек Амударья и Сырдарья, откуда происходит поступление водных ресурсов, и оценке его влияния на Аральское море. Изучены также закономерности, отражающие последовательные стадии изменения геоэкологических условий в пределах морского ложа, обнажившегося по мере отступления акватории моря. Это позволило выявить геодинамические процессы, характеризующие различные стадии формирования и изменения

¹ Атлас социально-экономических и экологических показателей региона Приаралья в Узбекистане. Ташкент: Baktria press, 2019. 46 с.

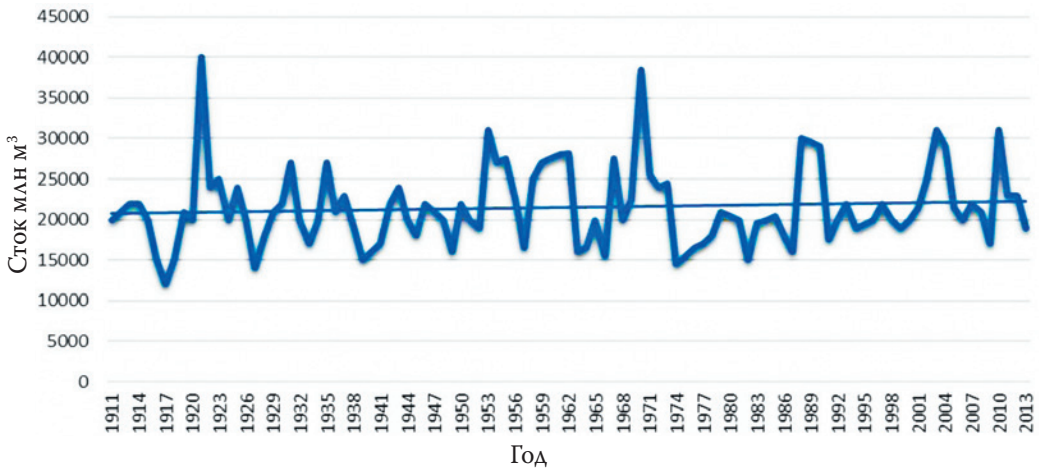


Рис. 1. Динамика изменения естественных ресурсов в пределах верхней части бассейна р. Сырдарья [21].

Fig. 1. Dynamics of changes of natural resources within the limits of the Syrdarya River upstream [21].

ассоциаций растительных сообществ в зависимости от продолжительности периода функционирования ландшафтов, сформировавшихся по мере освобождения ложа от водных масс. Выполненные полевые изыскания позволили обосновать мероприятия, направленные на мелиорацию земель, сформировавшихся на обширных площадях после высыхания Аральского моря.

Анализ материалов многолетних гидрологических наблюдений по верхней части бассейнов рек Амударья и Сырдарья показал отчетливый тренд постепенного увеличения речного стока за весь период наблюдений (рис. 1).

Следует обратить внимание на то, что речной сток является результирующим показателем, формирующимся в условиях взаимного влияния атмосферных осадков и испарения с поверхности речных водосборов. Они входят в более сложные показатели, отражающие характеристики тепло- и влагообеспеченности территорий. Соответственно, показатели суммарного испарения зависят от температуры атмосферного воздуха, которой также присуща пространственная и временная изменчивость. Кроме того, при выполнении гидролого-экологических и водохозяйственных расчетов и оценок необходимо учитывать закономерности, обусловленные региональным откликом глобального изменения климата. В отношении изучаемых бассейнов рек это проявляется в виде повышения температуры воздуха с 1980-х годов по настоящее время, что подтверждается графиком на рис. 2.

Анализ материалов, отражающих многолетнюю динамику изменения площадей орошаемых земель в бассейне р. Амударья, свидетельствует о том, что начиная с 1990-х годов наблюдаются стабильно высокие показатели – до 3,4 и более млн га. В 2010 г. зафиксированы наибольшие площади орошаемых зе-

мель – 3,51 млн га, в то время как в 1991 г. этот показатель составлял 2,94 млн га (рис. 3). Чрезмерное потребление водных ресурсов в пределах средних и нижних частей Амударьи и Сырдарьи привело к тому, что компенсационные возможности рек были исчерпаны, дальнейший рост безвозвратных изъятий речного стока и наступивший длительный период маловодья привели к резкому сокращению притока речных вод к Аральскому морю.

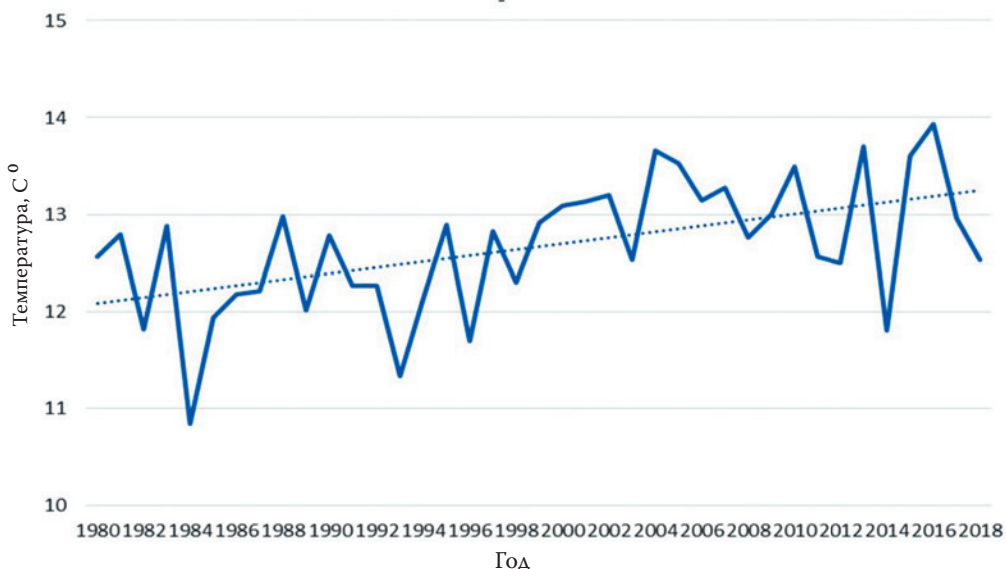


Рис. 2. Многолетняя динамика изменения температуры воздуха в верхней части Аральского бассейна².

Fig. 2. Many-year dynamics of the air temperature changes in the upper part of the Aral basin.

Начиная с 1982 г., поступление речных вод р. Амударьи в Аральское море по основному руслу прекратилось. Для оценки притока вод к морю после 1982 г. использованы данные в створе Кызылджар за вычетом потерь стока в дельте. Фактически приток амударьинских вод к морю в 1982, 1983 и 1985 годах полностью отсутствовал, а в 1984 г. не превышал 4 км³. Вследствие практически полного хозяйственного использования вод р. Сырдарьи и перекрытия ее основного русла в пределах дельты несколькими глухими насыпными плотинами приток речных вод в Аральское море с 1974 г. также прекратился. Незначительное количество вод, сбрасываемых в дельту Казалинским гидроузлом, полностью используется на обводнение обсыхающих водоемов дельты.

О характере изменения объема притока в Аральское море по рекам Амударья и Сырдарья с 1960 г. по настоящее время можно судить по графикам на рис. 4: резкая тенденция снижения притока вод наблюдается с начала 1960-х годов и продолжается до сих пор. Изменение количества и качества речных вод

² Соколов В.И. Региональный координатор GWP SACENA. Презентация. Семинар по оценке взаимосвязи между водой, продовольствием, энергией и экосистемами в бассейне реки Сырдарья. Алматы, Казахстан 2–4 декабря 2014 г. 21 с.

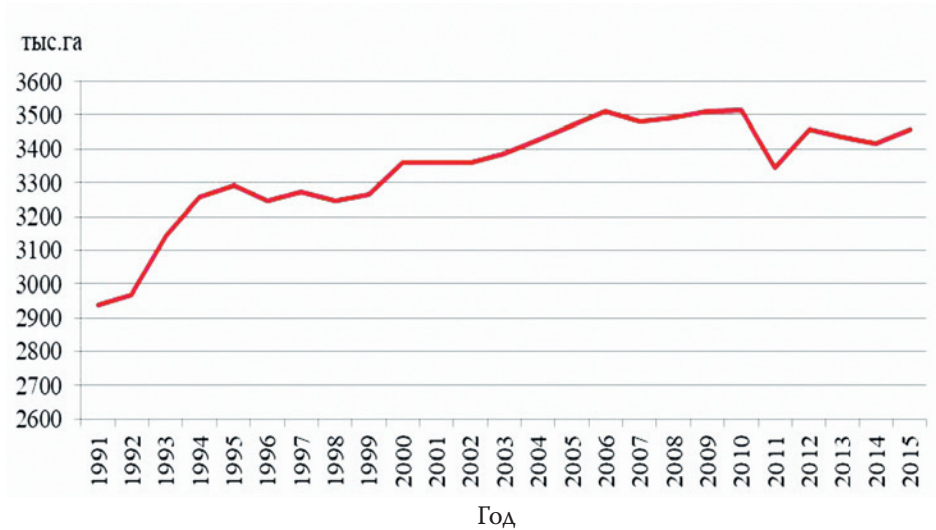


Рис. 3. Многолетняя динамика изменения площадей орошаемых земель в бассейне р. Амударья.

Fig. 3. Many-year dynamics of the changes of the irrigated lands area in the Amudarya river basin.



Рис. 4. Динамика объема годового притока по рекам Амударья, Сырдарья и суммарного притока в Аральское море.
Fig. 4. Dynamics of the annual inflow volume in the Amudarya, Syrdarya rivers and total inflow to the Aral Sea.

привело к существенному уменьшению водного питания, нарушению водного и солевого балансов моря, его прогрессирующему усыханию и осолонению и к практически полной деградации исторически сложившейся экосистемы.

Антропогенное воздействие на режим Аральского моря носит кумулятивный характер и на глазах одного поколения достигло таких масштабов, при которых встал вопрос о возможности дальнейшего существования этого природного объекта. Об этом достаточно отчетливо можно судить по космическим снимкам, представленным на рис. 5.

По мере высыхания моря на освободившихся от воды площадях сформировались совершенно новые ландшафты [17, 22]. По ним были изучены процессы зарастания растительностью, адаптированной к условиям засушливости, по мере их распространения в установившихся природно-климатических условиях.

Как показали наши наблюдения летом 2023 г., на высохшем дне Аральского моря встречается несколько видов растительности. В более высоких местах находят благоприятные для себя условия древесно-кустарниковые и травянистые растения: саксаул, различные виды кандымов и эфедра стручковая, а также разнообразные травянистые растения (*Artemisia terracalbae*, *Heliotropium lasiocarpum*, *Carex physodes*, *Corispermum lehenanianum*) и другие. В пределах песчаных поверхностей распространены псаммофитно-кустарниковые сообщества, где группируются кусты кандыма вместе с черным саксаулом и джугзуном. На этих территориях также произрастают разнообразные эфемеры и эфемероиды, такие как *Allium sabulosum* и *Tulipa sogdiana*, а также *Alyssum turkestanicum*, *Diptychocarpus strictus*, *Bromus tectorum* и другие травы. Вдоль

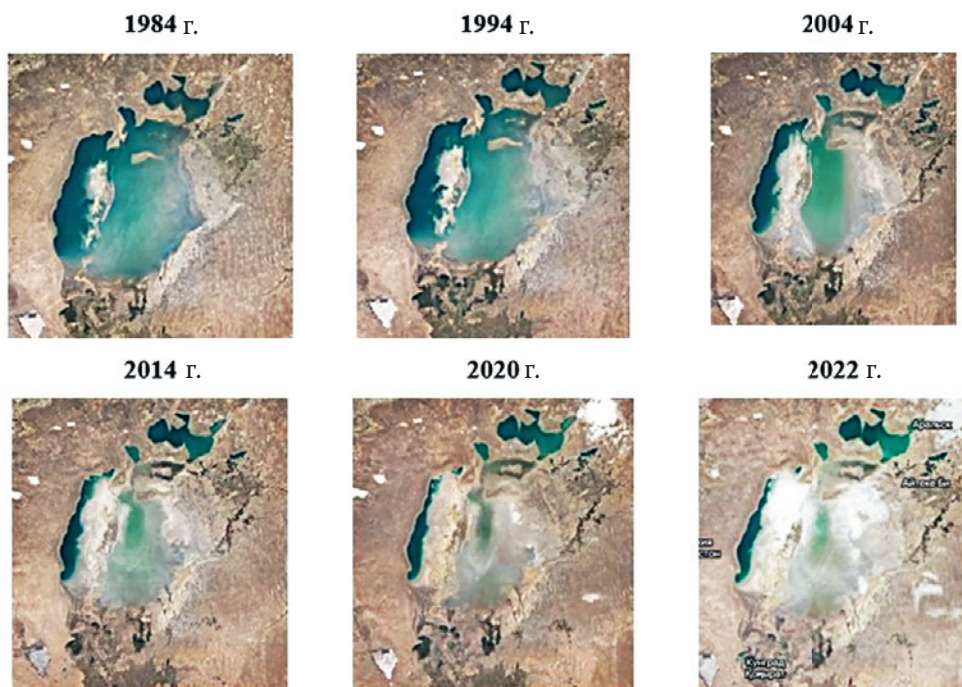


Рис. 5. Динамика изменения акватории Аральского моря.
Fig. 5. Dynamics of the Aral Sea water area changes.

восточного и южного берегов обсохшего дна Аральского моря можно встретить галофитов – *Atriplex dimirphostegia*, *Salicornia europea*, *Salsola micranthera*, *Tamarix hispida*, *Tamarix laxa*, *T. pentadra* и др.

Особую группу образуют элементы микрорельефа биогенного происхождения – вегетативные бугры, холмики и кочкарники, а также заросли тростника и гребенщика. Береговая растительность отступающего моря редко представлена галофитами, такими как *Suaeda*, *Tamarix hispida*, *T. laxa* и *T. pentadra*. В пределах выровненных песчаных ландшафтов встречаются солончаковые шоры, на которых растут *Halaxylon aphullum*, *Tamarix elongata*, *Tamarix laxa*, *Halostfachs belungiana*, *Salicornia europea*, *Suaeda salsa*.

Насыщение Аральского моря сульфатом кальция и начало осаждения гипса произошло при солености, превышающей 25–26 г/л. Однако наиболее интенсивная осадка гипса началась при солености выше 34–36 ‰. В этих условиях одновременно с осаждением гипса в зимний период происходило оседание мирабилита, представляющего наибольшую опасность для природы Приаралья. Сульфат натрия доступен ветровой эрозии и может легко перемещаться на большие расстояния.

Последствия Аральской катастрофы уже давно вышли за рамки региона. По предварительным оценкам, с высохшей акватории моря ежегодно разносится свыше 100 тыс. тонн соли и тонкодисперсной пыли с примесями различных химикатов, пагубно влияя на все живое. Эффект загрязнения усиливается тем, что Арал расположен на пути мощного струйного течения воздуха с запада на восток, способствующего выносу аэрозолей в высокие слои атмосферы. Следы солевых потоков прослеживаются на обширных площадях Евразии [23].

С точки зрения изучения закономерностей, отражающих динамические процессы в распространении различных видов растительности на освободившихся от воды площадях, вызывает интерес вопрос – с какой последовательностью и по каким количественным показателям видового состава растительности происходят изменения? Кроме того, важно знать, какова продолжительность времени, необходимая для завершения сукцессионных процессов и, соответственно, формирования характерных, относительно устойчивых ландшафтов при установившихся природно-климатических условиях. Какие мероприятия необходимо проводить на образовавшихся солончаках, которые занимают около 3,6 млн га.

С учетом изложенного методические положения исследований, проведенных в ходе полевых изысканий в 2023 г., базировались на изучении геоэкологических условий и изменения видового состава растительности в пределах бывшего ложа Аральского моря по мере увеличения периода с момента его освобождения от воды. Соответственно, они включали ряд этапов: составление картосхемы акватории Аральского моря с учетом различных временных уровней (рис. 7); положение ландшафтного профиля и размещение точек расположения ключевых участков по соответствующим временным уровням; изучение видового состава и условий произрастания растительных сообществ в пределах эксперименталь-

ных участков; изучение характера распространения солончаков, предварительное обоснование путей и методов их мелиорации с учетом необходимости минимизации негативных воздействий на окружающую среду.

Полевые изыскания и наблюдения проводили по ключевым участкам размерами 10x10 м, а также 50x50 м с учетом их расположения по профилю, охватывающему естественные ландшафты за пределами Аральского моря за все годы его существования (контрольная площадка) и новые ландшафты, находящиеся в условиях сукцессионных процессов при сложившихся природно-климатических условиях по мере отступления моря (рис. 6). Необходимость проведения наблюдений на площадках размерами 50x50 м обусловлена тем, что недавно освободившиеся площади ложа моря (2010–2020 гг.) характеризовались отсутствием или резко ограниченным количеством растительности на обширных площадях. Таким образом, изучение изменения видового состава растительности осуществлялось по участкам, имеющим последовательные стадии проявления сукцессионных процессов от 62 лет до одного года по маршруту от периферии к середине моря (до бывшего острова Возрождение).

В последующем он пролегал перпендикулярно в западном направлении относительно основного профиля с учетом того, что здесь сохранилась оставшаяся часть акватории моря к моменту проведения изысканий.

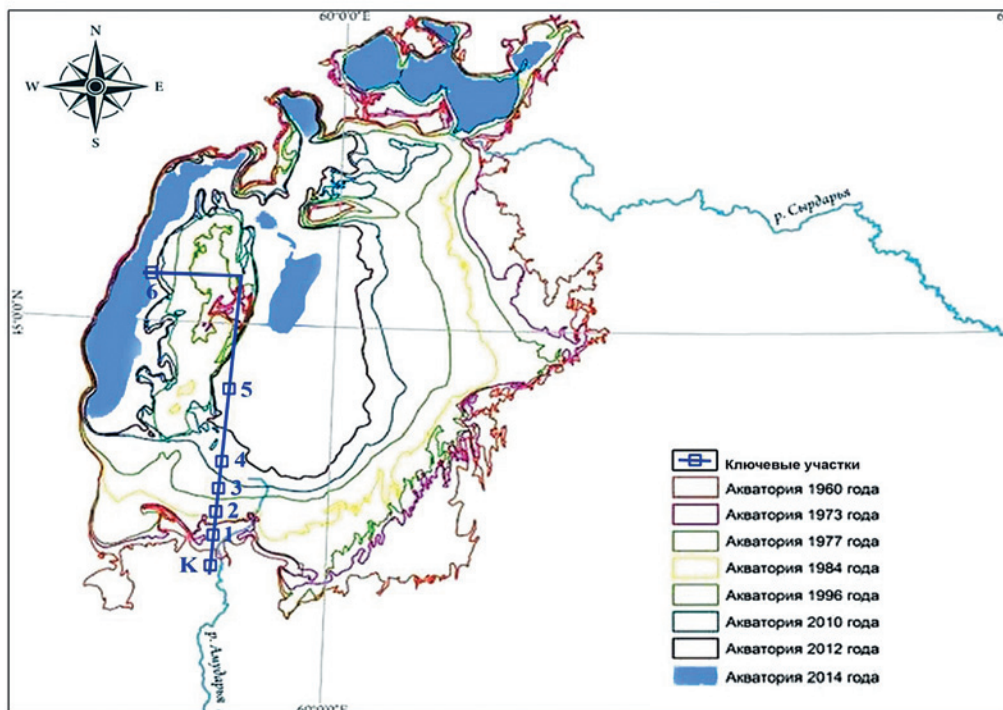


Рис. 6. Границы акватории Аральского моря в различные временные периоды и точки расположения ключевых участков вдоль ландшафтного профиля.

Fig. 6. Boundaries of the Aral Sea water area during different time periods and the points of the key sites location along the landscape profile.

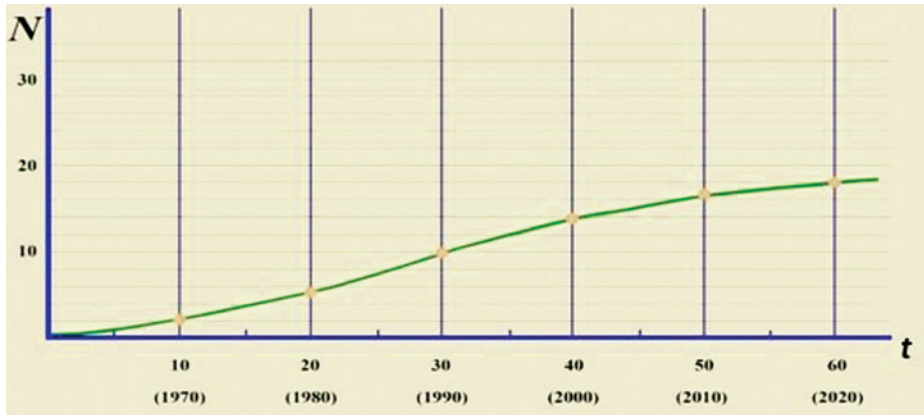


Рис. 7. Изменение видового состава растительности во времени в пределах бывшего дна Аральского моря.

Fig. 7. Changes of the vegetation species composition in time within the boundaries of the Aral Sea former bottom.

Общая продолжительность ретроспективного периода составила 62 года. Размещение ключевых участков вдоль профиля осуществлялось с учетом последовательного перемещения границы моря (уреза воды) средней продолжительностью временных интервалов: 1960–1970 гг.; 1971–1980; 1981–1990; 1991–2000; 2001–2010 и 2011–2020 гг. Зона распространения акватории моря по указанным периодам уточнялась на основании проведения опроса местных жителей (г. Муйнак). Следует подчеркнуть, что применение обратного по времени отсчета позволяет с достаточной уверенностью выявлять закономерности происходящих изменений видового состава растительности.

Известно, что динамика изменения видового состава растительности во времени, а также прогнозная оценка количества видов на перспективу могут осуществляться на основании применения так называемых логистических кривых. С учетом изложенного был выполнен графический анализ полученной информации, который отражен на рис. 7. Увеличение количества видов растительности (N) в зависимости от продолжительности прошедшего времени в количествах лет (t) может быть выражено в виде зависимости $N = f(t)$, которую ориентировочно можно применять для прогнозных оценок. Следует подчеркнуть, что несомненным достоинством изложенной методики, учитывающей возможность осуществления прогнозных оценок по участкам, освобожденным от воды в последние годы, является необязательность проведения продолжительных полевых наблюдений, чтобы оценить через какое время будет то или иное количество видов на экспериментальных участках. Например, по графику, представленному на рис. 7, можно увидеть, что на ранее обнаженных (освобожденных от воды) участках в среднем через 10 лет будут наблюдаться 2–3 вида, через 20 лет 5–6 видов, через 30 лет 9–10 видов, 40 лет 13–14 видов, через 50 лет 16–17 видов и через 60 лет 17–18 видов растительности. При этом следует учесть, что на контрольных площадках, расположенных в пределах естественных ландшафтов, прилегающих к морю территорий, на-

считывается 18 видов растений. Таким образом, относительно полное насыщение участка количеством видов, характерных для естественных ландшафтов прилегающих территорий, будет происходить в течение не менее 60 лет. Однако это имеет отношение к тем территориям, в пределах которых сформировался нормальный солевой баланс, без образования солончаков.

Таким образом, процесс распространения растительности на вновь образовавшихся площадях очень медленный, его ускорение требует проведения специальных мероприятий, включая посевы семян, посадку саженцев и т. д., и соответствующих финансовых затрат.

По солончакам, в пределах которых процессы зарастания растительностью отсутствуют или резко ограничены в связи с неблагоприятными условиями, необходимо разрабатывать самостоятельные мероприятия, включая их мелиорацию с учетом водно-балансовых и гидрологических составляющих, участвующих в растворении, миграции и накоплении солей, с оценкой возможности их последующего использования в хозяйственных целях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что резкое снижение стока рек Амударья и Сырдарья в пределах средней и нижней частей их бассейнов обусловлено, главным образом, забором и чрезмерным потреблением их водных ресурсов на орошение сельскохозяйственных угодий. Несмотря на то, что за анализируемый период (с 1960-х годов по настоящее время) в верхних частях бассейнов рек наблюдается некоторое увеличение речного стока, расходование потребляемой воды преимущественно на орошение сельскохозяйственных земель и формирование безвозвратных потерь в пределах средней и нижней частей бассейнов являются причиной формирования отрицательного водохозяйственного баланса в целом по Аральскому морю. Это привело к тому, что оно высохло, обусловив формирование совокупности отрицательных хозяйственно-экономических и экологических последствий.

В пределах освободившихся от воды площадей сформировались новые ландшафты, наметились сукцессионные процессы растительности, характеризующиеся слабыми тенденциями развития. Наиболее экологические неблагоприятные последствия связаны с образованием солончаков, в пределах которых сукцессионные процессы в настоящее время не отслеживаются. В этих условиях сформировались факторы, способствующие активному развитию дефляции почв и песчаных отложений, формированию пыльных бурь с выносом большого количества материала далеко за пределы территории, ранее занятой акваторией Аральского моря.

В целом природно-климатические условия в пределах вновь сформированных ландшафтных образований неблагоприятны для формирования активных процессов зарастания засухоустойчивой растительностью. Это требует эффективного проведения мероприятий, направленных на активизацию условий распространения растительности, в т. ч. и мелиорацию образовавшихся на обширных площадях солончаков в целях их активного использования в хозяйственно-экономической, рекреационно-туристской деятельности, в охотничьем хозяйстве и других отраслях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аденбаев Б.Е. Ф.Х. Хикматов. Оценка современного состояния гидрологического режима и водообеспеченности низовьев реки Амударьи: монография. Ташкент, 2021. 175 с.
2. Аширбеков У., Зонн И. Арал: история исчезающего моря. Душанбе, 2003. 86 с.
3. Аральское море и Приаралье / под ред. В.А. Духовного. Ташкент, НИЦ МКВК, 2015. 108 с.
4. Курбанбаев Е., Артыков О., Курбанбаев С. Аральское море и водохозяйственная политика в республиках Центральной Азии. Нукус: «Каракалпакстан», 2010. 144 с.
5. Проблемы Аральского моря и природоохранные мероприятия / сб. научн. трудов САНИИРИ. Ташкент, 1987. 127 с.
6. Чембарисов Э.И. Гидрохимия орошаемых территорий (на примере бассейна Аральского моря). Ташкент: Фан, 1988. 104 с.
7. Житомирская О.М. Климатическое описание района Аральского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 67 с.
8. Зайков Б.Д. Водный баланс и уровень Аральского моря в связи со строительством Главного Туркменского канала // Труды Государственного гидрологического института. Вып. 16. Л.: Гидрометеиздат, 1952. 44 с.
9. Зеринг Д., Дибольд А. От ледников до Аральского моря: Вода объединяет Trescher Verlag. Бизнес-область Издательская и полиграфическая деятельность, тиражирование записанных носителей, имиджмейкеры и СМИ Берлин, Германия. 2012. 263 с.
10. Рафииков А.А., Тетюхин Г.Ф. Снижение уровня Аральского моря и изменение природных условий низовьев Амударьи. Ташкент: Фан, 1981. 200 с.
11. Шульц В.А. Водный баланс Аральского моря // Труды САРНИГМИ. 1975. Вып. 23. (104). С. 3–28.
12. Дренаж в бассейне Аральского моря в направлении стратегии устойчивого развития / под ред. В.А. Духовного. Ташкент, 2004. 316 с.
13. Духовный В.А. и др. Научно-технический прогресс и мелиорация земель в Средней Азии. Ташкент: Мехнат, 1985. 141 с.
14. Киндлер Я., Духовный В.А. и др. Основные положения региональной стратегии в бассейне Аральского моря. Алма-Ата, 1997. 66 с.
15. Проблемы устойчивого управления водными ресурсами в бассейне Аральского моря на рубеже XXI века (краткое изложение результатов исследований по Межгосударственной программе МКВК, выполненных в 2001 году) / сб. научн. трудов САНИИРИ и НИЦ МКВК. Ташкент, 2002. 231 с.
16. Разработка основных компонентов политики МКВК в вопросах рационального водопользования и охраны водных ресурсов в бассейне Аральского моря / сб. научн. трудов НИЦ МКВК. Вып. 2. Ташкент, 2000. 139 с.
17. Курбаниязов А.К. Эволюция ландшафтов обсохшего дна Аральского моря. М.: Изд. дом Академии естествознания, 2017. 148 с.
18. 18. Комплексные дистанционные и наземные исследования осушенного дна Аральского моря / под ред. В.А. Духовного. Ташкент, 2008. 190 с.
19. Мамбетуллаева С.М., Кочкарова С.А., Курбаниязов А.К., Туреева К.Ж. Особенности сукцессионных процессов и восстановительного потенциала фитоценозов на обсохшем дне Арала // Вопросы географии и геоэкологии. 2019. № 2. С 81–86.
20. Панкова Е.И., Айдаров И.П., Ямнова И.А., Новикова А.Ф., Благоволин Н.С. Природное и антропогенное засоление почв бассейна Аральского моря (география, генезис, эволюция). Москва, 1996. 180 с.
21. Соколов В.И.. Региональный координатор GWP SACENA. Презентация. Семинар по оценке взаимосвязи между водой, продовольствием, энергией и экосистемами в бассейне реки Сырдарья Алматы, Казахстан 2–4 декабря 2014 г. 21 с.
22. Попов В.А. Проблема Арала и ландшафты дельты Амударьи: (Структурно-динамическое состояние ландшафтов Южного Приаралья в связи с проблемой Арала). Ташкент: Фан, 1990. 108 с.
23. Ахмедова А.Р. Проблемы восстановления водного режима Аральского моря. СПб., 2016. 82 с.

REFERENCES

1. Adenbaev B.E. Modern hydrological regime and water availability in the lower reaches of the Amu Darya River. Tashkent. 2020 (In Russ.).
2. Ashirbekov U., Zonn I. Aral: History of the disappearing sea. Dushanbe, 2003. 86 p. (In Russ.).
3. Aral Sea and Priaralie / Generalisation of SIC ICWC works on state monitoring and situation analysis / Edited by Prof. V.A. Dukhovny. Tashkent, SIC ICWC, 2015. 108 p. (In Russ.).
4. Kurbanbaev E., Artykov O., Kurbanbaev S. The Aral Sea and Water Policy in the Republics of Central Asia. Nukus: "Karakalpakstan", 2010. 144 p. (In Russ.).
5. Problems of the Aral Sea and nature protection measures / Collection of scientific works of SANIIRI. Tashkent, 1987. 127 p. (In Russ.).
6. Chembarisov E.I. Hydrochemistry of irrigated areas (on the example of the Aral Sea basin). Tashkent: Fan, 1988. 104 p. (In Russ.).
7. Zhitomirskaya O.M. Climatic description of the Aral Sea area. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1964. 67 p. (In Russ.).
8. Zaikov B.D. Water balance and level of the Aral Sea in connection with the construction of the Main Turkmen Canal. *Proceedings of the State Hydrological Institute*. Vol. 16. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1952. 44 p. (In Russ.).
9. Ziering D., Diebold A. From Glaciers to the Aral Sea: Water Unites Trescher Verlag, 2012. 263 c. (In Russ.).
10. Rafikov A.A., Tetyukhin G.F. Reduction of the Aral Sea level and change of natural conditions of the lower reaches of the Amu Darya. Tashkent, "Fan", 1981. 200 p. (In Russ.).
11. Shultz V.L. Water balance of the Aral Sea. *Proceedings of SARNIGMI*. 1975. Vol. 23 (104). P. 3–28 (In Russ.).
12. Drainage in the Aral Sea basin in the direction of sustainable development strategy / edited by Prof V.A. Dukhovny. Tashkent, 2004. 316 p. (In Russ.).
13. Dukhovny V.A. et al. Scientific and technical progress and land reclamation in Central Asia. Tashkent: "Mekhnat", 1985. 141 p. (In Russ.).
14. Main provisions of the regional strategy in the Aral Sea basin / Kindler J., Dukhovny V.A. et al. Alma-Ata, 1997 (In Russ.).
15. Problems of sustainable water resources management in the Aral Sea basin at the turn of the XXI century (summary of the results of research under the ICWC Interstate Programme carried out in 2001). *Collection of scientific works of SANIIRI and SIC ICWC*. Tashkent, 2002. 231 p. (In Russ.).
16. Development of basic components of ICWC policy in issues of rational water use and protection of water resources in the Aral Sea basin. *Collection of scientific works of SIC ICWC*. Vol. 2. Tashkent, 2000 (In Russ.).
17. Kurbaniyazov A.K. Evolution of landscapes of the dried Aral Sea bed. Moscow: Publishing House of the Academy of Natural Sciences, 2017. 148 p. (In Russ.).
18. Integrated remote sensing and ground-based studies of the dried Aral Sea bed/ edited by Prof V.A. Dukhovny. Tashkent, 2008. 190 p. (In Russ.).
19. Mambetullaeva S.M., Kochkarova S.A., Kurbaniyazov A.K., Tureeva K.J. Features of successional processes and restoration potential of phytocenoses on the dried Aral Sea bed *Issues of geography and geo/ecology*. No. 2. 2019 (In Russ.).
20. Natural and anthropogenic salinisation of soils in the Aral Sea basin (geography, genesis, evolution) / E.I. Pankova, I.P. Aidarov, I.A. Yamnova, A.F. Novikova, N.S. Blagovolin. Moscow, 1996 (In Russ.).
21. Sokolov V.I. Regional Coordinator of GWP CACENA. Workshop on the Water-Food-Energy-Ecosystems Nexus Assessment in the Syrdarya River Basin Almaty, Kazakhstan 2-4 December 2014 (In Russ.).
22. Popov V.A. The Aral Sea problem and landscapes of the Amu Darya delta: (Structural and dynamic state of landscapes of the Southern Priaralie in connection with the Aral Sea problem). Tashkent: Fan, 1990. 108 p. (In Russ.).
23. Akhmedova A.R. Problems of restoration of the Aral Sea water regime (Master's thesis). St. Petersburg, 2016. 82 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Гареев Ауфар Миннигазимович, д-р геогр. наук, профессор, заведующий лабораторией водохозяйственных исследований и геоэкологии, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия, 450074, г. Уфа, ул. З. Валиди, д. 32; ORCID: 0000-0002-5517-7909; e-mail: aufar.gareev@mail.ru

Азимова Сайера Неъматулло кизи, ст. преподаватель Джизакского государственного педагогического университета, Узбекистан, 130100, г. Джизак, ул. Ш. Рашидова, д. 4; e-mail: gulimmani02@gmail.com

Уролов Сардор Уралович, аспирант, кафедра геологии, гидрометеорологии и геоэкологии, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия, 450074, г. Уфа, ул. З. Валиди, д.32; e-mail: sardorurolov23@gmail.com

About the authors:

Aufar M. Gareev, Doctor of Geographic Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Water Research and Geocology, Ufa University of Science and Technology, ul. Z. Validy, 32, Ufa, 450074, Russia; ORCID: 0000-0002-5517-7909; e-mail: aufar.gareev@mail.ru

Sayera N. Azimova Sayera, Senior Lecturer, Jizzak State Pedagogical University, ul. Sh.Rashidova, 4, Jizzak, 130100, Uzbekistan; e-mail: gulimmani02@gmail.com

Sardor U. Urolov, Postgraduate Student, Department of Geology, Hydrometeorology and Geocology, Ufa University of Science and Technology, ul. Z. Validy, 32, Ufa, 450074, Russia; e-mail: sardorurolov23@gmail.com

Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища)

Ю.А. Федоров^{1,2}  , Д.Н. Гарькуша^{1,2} , А.Е. Косолапов² 
Е.В. Усова² , Е.А. Анпилова² , М.А. Верещагин² , А.И. Беляев³ 

 fedorov@sfedu.ru

¹ Институт наук о Земле Южного федерального университета,
г. Ростов-на-Дону, Россия

² Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия

³ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и
защитного лесоразведения Российской академии наук, г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Проанализированы и обобщены обширные оригинальные данные и опубликованные материалы, касающиеся вопросов изучения формирования выбросов и поглощения CH_4 в искусственных и естественных водных объектах. **Результаты.** На основе проведенного анализа предложен подробный план экспедиционных и экспериментальных работ, направленных на установление вклада ключевых факторов, влияющих на формирование удельных потоков и стоков CH_4 и его баланс, а также оценку суммарной годовой эмиссии CH_4 из Цимлянского водохранилища – как наиболее крупного пресного водоема в степной зоне европейской части России. Показано, что для каждого водного объекта характерен набор специфических условий и показателей, которые контролируют распределение в воде и донных отложениях содержания метана и его эмиссию в атмосферу. Установлено, что большая вариативность концентраций и удельных потоков метана в водохранилищах связана с изменчивостью гидрологических и морфологических особенностей, обуславливающих интенсивность продукционно-деструкционных процессов, характером механической миграции органического и минерального вещества и распределением литологических типов донных отложений на разных участках водоема. Значительное воздействие оказывают также ветровая активность и поступление соединений углерода, азота и фосфора с поверхности водосбора и в результате разложения органического вещества почв и растительности, затопленных при наполнении водохранилища. Результаты комплексных натурных наблюдений на Цимлянском водохранилище планируется использовать при разработке и апробации методики и методологии оценки эмиссии метана с поверхности крупных водохранилищ и озер степной зоны юга России.





КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метан, диоксид углерода, органическое вещество, выбросы, водохранилище, мониторинг, эмиссия климатически активных газов.


Для цитирования: Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.А., Верещагин М.А., Беляев А.И. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–72. DOI:10.35567/19994508-2024-3-68-72.

Дата поступления 16.05. 2024.

© Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.А., Верещагин М.А., Беляев А.И., 2024

ARTIFICIAL WATER BODIES AS METHANE GENESIS HOTBEDS (THE TSIMLYANSK RESERVOIR AS AN EXAMPLE)

Yuriy A. Fedorov^{1,2}  , Dmitry N. Garkusha^{1,2} , Aleksey E. Kosolapov² ,
Elena V. Usova² , Evgenia L. Anpilova² , Mikhail A. Vereshchagin² ,
Aleksandr I. Belyaev³ .

 fedorov@sfedu.ru

¹ *Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-na-Donu, Russia*

² *Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-na-Donu, Russia*

³ *Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land-reclamation and Protective Forestry of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia*

ABSTRACT

Relevance. We have analyzed and summarized comprehensive original data and published materials dealing with issues of investigation of CH₄ discharges and absorption in artificial and natural water bodies. **Results.** We suggested a detailed plan of expeditions and experiments based on the conducted analysis and aimed at determination of the key factors contribution in formation of the CH₄ specific flows and discharges and its balance, as well as estimation of the CH₄ total annual emission from the Tsimlyansk reservoir, the largest fresh water body in the European Russia steppe zone. It has been demonstrated that a set of special conditions and indicators that control the methane content distribution in water and bottom sediments, as well as its emission into the atmosphere is typical for every water body. We have stated that greater methane concentrations and specific flows variability is connected with the variability of hydrological and morphological specific features that cause intensity of the production-destruction processes, and determine the organic and mineral matter mechanic migration character and distribution of the bottom sediments lithological types at the water body different ranges. The results of integrated field observations at the Tsimlyansk reservoir are planned to be used in development and testing of the methods and methodology of estimation of the methane emission from the surface of major reservoirs and lakes of the South Russia steppe zone.

Keywords: methane, carbon dioxide, organic substance, выбросы, water reservoir, monitoring, climate-active gases emission.

For citation: Fedorov Y.A., Garkusha D.N., Kosolapov A.E., Usova E.V., Anpilova E.L., Vereshchagin M.A., Belayev A.I. Artificial water bodies as methane genesis hotbeds (the Tsimlyansk reservoir as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 68–72. DOI:10.35567/19994508-2024-3-68-72.

Received 16.05. 2024.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время последствия парникового эффекта, негативные воздействия которого на Землю возрастают, вызывают серьезную озабоченность мирового сообщества. Основная роль в парниковом эффекте отводится атмосферным парниковым газам: углекислый газ, метан, фреоны и др., влияющим на температуру атмосферы нашей планеты. Диоксид углерода (CO₂) и метан (CH₄) являются двумя наиболее важными парниковыми газами. Недавний мониторинг, проведенный Всемирной метеорологической

организацией, показывает, что концентрации CH_4 и CO_2 в глобальной атмосфере достигли 1869 ± 2 частей на миллиард и $408,0 \pm 0,1$ частей на миллион. Наблюдается их устойчивый рост на 259 % и 147 % соответственно со времен промышленной революции [1].

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации¹ Правительству РФ в целях реализации Парижского соглашения от 12 декабря 2015 г. поручено «... обеспечить к 2030 году сокращение выбросов парниковых газов до 70 процентов относительно уровня 1990 года...». Необходимо достигнуть поставленной цели при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития России. Во исполнение Указа Президента была разработана Стратегия развития РФ². Одним из важных показателей реализации Стратегии является достижение объемов выбросов и поглощений парниковых газов.

Основными источниками поступления метана в атмосферу (порядка 60 % общей эмиссии) являются водоемы (болота, озера, водохранилища и т. д.), крупный рогатый скот и рисовые участки полей [1– 3]. По образному выражению [4], водохранилища – это часть глобальной «сети пресной воды», в результате эксплуатации которых в атмосферу возвращается в виде CH_4 и CO_2 «часть земного углерода».

Целью статьи является исследование состояния проблемы изучения образования и распределения содержаний и потоков органического вещества (ОВ) и CO_2 в водохранилищах и их водосборном бассейне для понимания того, как в процессе их эксплуатации создаются условия для формирования выбросов CH_4 . Это станет первым шагом, направленным на разработку комплекса сочтанных количественных балансовых моделей потоков ОВ, CO_2 и CH_4 как основы для прогнозирования и выработки предложений по сокращению выбросов метана на примере Цимлянского водохранилища.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Водоохранилища являются источниками водоснабжения и орошения, объектами энергетики и судоходства, рыбного хозяйства. В то же время, образование и эксплуатация водохранилищ могут вызывать немало экологических проблем: изъятие из оборота земель сельскохозяйственного назначения, изменение гидролого-гидрогеологического режима поверхностных и грунтовых вод на водосборных бассейнах, изменение климата на прилегающих территориях. Водоохранилища, являясь резервуарами-накопителями (пулами) аллохтонного и автохтонного органического вещества (ОВ), трансформируя его, становятся сосредоточенными источниками эмиссии парниковых газов.

В литературе представлено неоднозначное толкование некоторых терминов, поэтому остановимся на их кратком обзоре. Так, термины «выбросы» и

¹ Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов».

² Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 29 октября 2021 года № 3052-р «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».

«поглощение» парниковых газов используются, соответственно, как синонимы «эмиссии, выделения» и «стока». С физической точки зрения, это не совсем верно. Укоренившееся в западной и затем в российской литературе понятие «выбросы» парниковых газов подразумевает их суммарную эмиссию путем диффузии и конвективного переноса в воде (пузырьковый транспорт), а также выделение через паренхиму водных растений. В отдельных работах рассматривается «эмиссионный» поток парниковых газов как результат «диффузии» и конвективного переноса. При этом сделан вывод, что обычно пузырьковый транспорт превалирует над диффузией [5, 6] газов в воде, поэтому вполне правомерно его суммарный эмиссионный поток называть «выбросом».

Ниже остановимся на анализе фундаментальных достижений, полученных при изучении формирования концентраций и потоков метана в естественных и искусственных водных объектах, которые могут быть кратко сформулированы следующим образом.

Затопление и последующая деградация наземного ОВ происходит в течение первого десятилетия существования водоема [7, 8]. Приходная часть баланса органического вещества водной толщи и донных осадков определяется, главным образом, внутриводоемными процессами (жизнедеятельность растений и животных организмов), в то время как аллохтонная составляющая играет подчиненную роль [9, 10].

Усиление притока с внешнего контура водоемов ОВ антропогенного происхождения, которое преимущественно представлено «лабильным» органическим веществом, активизирует процессы образования восстановленных газов, что было показано в работах [2, 11], в т. ч. и на примере Цимлянского водохранилища. В результате «атаки» бактерий метаногенов на субстраты биодеструкции ОВ (CO_2 , H_2 и др.) образуется метан. Это происходит на так называемой «метаногенной стадии». Работа этих бактерий начинается только тогда, когда вследствие разрушения органического вещества микроорганизмами предыдущих стадий появляются следующие субстраты: водород, диоксид углерода, закись углерода, формиат, ацетат, метанол и метилированные амины [2, 12, 13]. Показано [14], что бактерии метаногены конкурируют за обладание питательных субстратов с бактериями сульфатредукторами. Процессы сульфатредукции и метаногенеза могут идти как симбатно, так и создавать друг другу конкуренцию. Согласно термодинамическим расчетам, в борьбе за молекулярный водород выигрывают сульфатредуцирующие бактерии, что вызывает некоторое подавление скорости метаногенеза.

Существование тесной прямолинейной связи между содержанием в донных отложениях метана и ОВ является фактом, доказанным авторами монографии как напрямую [15], так и косвенно по приуроченности максимальных содержаний метана к местам свала антропогенного ОВ [2].

Биогенные компоненты, не являясь загрязняющими веществами, могут вызывать вспышки появления синезеленых и других водорослей. Образующийся при фотосинтезе водорослями кислород ингибирует метаногенез, способствуя окислению метана [16]. Но после отмирания водорослей они способны вызы-

вать усиление эвтрофирования водохранилища, которое обусловлено биодegradацией водорослей с образованием легкоокисляемого органического вещества. Попав в донные отложения, фрагменты легкоокисляемого ОВ продолжают биодеградировать под воздействием аэробных и анаэробных бактерий с образованием эмиссионных потоков диоксида углерода, сероводорода, метана и др. [2].

Содержание кислорода в водной толще, и особенно в придонном слое воды, определяет направление процессов распада органических веществ в поверхностном слое донных отложений, оказывает большое влияние на скорость образования метана и его концентрацию. В неглубоких водных объектах донные отложения являются доминирующим источником CH_4 в водной толще, поступая в которую он, частично растворяясь и окисляясь, мигрирует далее в атмосферу [2].

Процессы, происходящие на водосборе, могут изменить гидрологическую, гидробиологическую и гидрохимическую обстановку в чаше водохранилища, и таким образом оказаться триггером изменения приходных и расходных статей баланса метана. Регулируемый сброс воды через нижний бьеф вызывает существенные колебания уровня воды в водохранилище. При снижении уровня наблюдается оголение и осушка мелководных районов водохранилища (заливы, бухты). При этом в первое время после осушки происходит усиление эмиссии метана в атмосферу, а затем его поток снижается. Подобное явление наблюдалось авторами [17] в широко известных грязях месторождения Ханского озера, в котором после потери гидравлической связи с питающими его морскими водами началось высыхание грязей, снижение в них содержания CH_4 и сульфидов и, в конечном итоге, деградация пелоидов и уменьшение эмиссии метана.

Исследователи [16], обсуждая выполненный ими «Взаимосвязанный проект «Река–озеро», пришли к мнению, что он способствовал снижению выбросов CO_2 и CH_4 городских рек. Корреляционный анализ показал, что сезонные колебания CO_2 и CH_4 выбросов контролировались содержанием кислорода и температурой. Следовательно, самые высокие выбросы CO_2 наблюдались весной и самые низкие – зимой: CO_2 выбросы весной были в 10,7 раза выше, чем зимой. Наиболее высокие выбросы CH_4 отмечены летом и самые низкие зимой. CH_4 выбросы летом были в 6,6 раза выше, чем зимой. Это исследование подтвердило реальность ранее полученных нами регрессионных уравнений, демонстрирующих положительную связь между температурой воды, с одной стороны, и концентрацией метана и его потоками, – с другой [18]. Во время поступления воды через верхний бьеф наблюдается промывка водохранилища, которая особенно сильно проявляется в каньоне затопленного русла р. Дон. Этот процесс можно сравнить с шунтированием кровеносных сосудов человека. Происходит в одних местах акватории взмучивание верхних слоев донных отложений, а в других, наоборот, – лавинообразное накопление. Этот процесс сопровождается сначала усилением пузырькового транспорта метана, а после окончания нагона воды и перемешивания водных масс, доминированием диффузионного массопереноса и выравниванием концентраций и потоков метана в толще воды и по акватории водоема. Подобное явление было зафиксировано в Азовском море в штормовых условиях и при относительно безветренной погоде [2, 19].

В работе [5] представлена концептуальная модель, которая продемонстрировала как влияет эксплуатация водохранилища, вызывающая в нем колебания уровня воды (WLF), на эмиссию (выбросы) CH_4 . Однако ограниченность этой концептуальной модели состоит в том, что она указывает пути, которые могут способствовать регулированию поступления и попусков воды в процессе эксплуатации водохранилища, но совершенно не ясно, как это может помочь сокращению эмиссионных потоков метана. По мнению [5], для частичного решения проблемы необходимо субдневное разрешение, чтобы соответствовать разрешению наполнения водохранилища и попускам из него (контрольная переменная), а также моделировать глубинную стратификацию и оборот воды. Очевидно, эти задачи трудно реализовать, а цель – управлять потоками парниковых газов только с помощью качественной виртуальной модели, вряд ли, может быть достигнута.

Авторами [20, 21] была создана одномерная термогидродинамическая и биогеохимическая модель LAKE, способная дать уточненные оценки (инвентаризацию) годового потока метана для водоемов с учетом их основных морфометрических, гидрологических характеристик, а также атмосферного воздействия. Однако, как отмечено в работе [6], эта модель требовала верификации на конкретном водном объекте, которым является водохранилище. Авторы протестировали механистическую модель LAKE 2.3 на ее способность прогнозировать выбросы метана (CH_4) из водоемов. Оценка эмиссионных потоков CH_4 из Можайского водохранилища (Московская обл.), полученная с помощью модели, показала хорошее согласие с инструментальными натурными наблюдениями по ряду параметров водной экосистемы [6]. Сделан вывод [6], что результаты исследования могут быть использованы для разработки механистических моделей и стать необходимым шагом на пути к региональному и глобальному прогнозированию выбросов метана из озер с использованием LAKE 2.3.

В ранее проведенных исследованиях на Рыбинском водохранилище [19] в донных отложениях Шекснинского плеса, куда поступают сточные воды Череповецкого металлургического комбината, была установлена прямолинейная связь между концентрацией метана и содержаниями нефтяных углеводородов, смолистых компонентов и их суммы. Кроме легких углеводородов и смолистых компонентов в донных отложениях обнаружены 2-3-4-ядерные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), идентифицированы следующие соединения: нафталин, метилнафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, пирен, бенз(а)пирен и другие. Это свидетельствовало о положительном влиянии органических загрязняющих веществ на содержание и потоки метана в воде водотоков и водоемов.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОСТАВУ РАБОТ И ОРГАНИЗАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ В ЦИМЛЯНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Для установления ключевых факторов, влияющих на формирование удельных потоков (выбросов) и поглощения (стоков) CH_4 и их баланс, а также оценки суммарной годовой эмиссии CH_4 из Цимлянского водохранилища

авторами предлагается следующий состав исследований и оптимизация, по отношению к ранее представленной в [11], схемы расположения станций мониторинга (рисунок).

1. На станциях мониторинга в различные гидрологические фазы (период весеннего перемешивания, пик половодья, летняя стратификация, после ледостава) провести водные и наземные экспедиционные исследования Калачского, Чирского, Центрального и Приплотинного участков Цимлянского водохранилища для отбора проб воды и донных отложений, а также натуральных измерений удельных потоков и стоков CH_4 на границах раздела «вода – атмосфера». Точки наблюдений планируется располагать на обозначенных выше участках таким образом, чтобы исследовать как глубоководные, так и мелководные зоны водохранилища. С целью оценки эмиссии CH_4 при сбросе вод в нижний бьеф водохранилища во все периоды наблюдений планируется выполнять отбор проб воды для определения его концентраций до и после плотины.

В ходе экспедиционных исследований отбор проб будет проводиться в поверхностном и придонном слоях и в 0–2 см горизонте донных отложений. В отдельных глубоководных точках отбор проб воды также будет выполнен и в промежуточных слоях. В точках, расположенных возле берега, – только в поверхностном слое. С целью изучения распределения метана и других гидрохимических показателей по вертикальному профилю донных отложений, помимо 0–2 см горизонта, в отдельных точках будут опробованы и более глубокие горизонты (2–5 см, 5–10 см, 10–15 см и далее через каждые 5–10 см отобранного керна).

При проведении экспедиционных исследований в точках отбора проб воды и донных отложений, а также измерений удельных потоков и стоков CH_4 будут учитываться гидродинамические и гидрометеорологические характеристики (атмосферное давление, скорость и направление ветра, волнение, скорость течения, температура воздуха). В воде водохранилища для корреляционного анализа тесноты связей с концентрациями и потоками CH_4 будут измерены следующие гидрохимические показатели: температура, цветность, прозрачность, взвешенные вещества, общий органический углерод, растворенный кислород, БПК, ХПК, электропроводность, рН, аммонийный, нитратный и нитритный азот, фосфат-ионы. В донных отложениях будут контролироваться показатели: Eh и рН, влажность и плотность, аммонийный и нитратный азот, ионы калия, кальция, магния и натрия, сульфат-ион, хлорид-ион, фосфат-ион, ацетат, оксалат, формиат, общий азот и фосфор, органическое вещество, нефть и нефтепродукты и гранулометрический состав. Также будет проведено визуальное описание донных отложений (цвет, запах, консистенция, структура, литологический тип и т. д.).

Для расчета баланса органического вещества как одного из основных факторов, контролирующих формирование концентраций и потоков CH_4 , необходимо провести определение концентрации ОВ в водах р. Дон, поступающих в верхний бьеф; в устьях притоков; в водах водохранилища, сбрасываемых в нижний бьеф (перед плотиной); в жидких и твердых атмосферных выпадениях и в склоновом стоке.

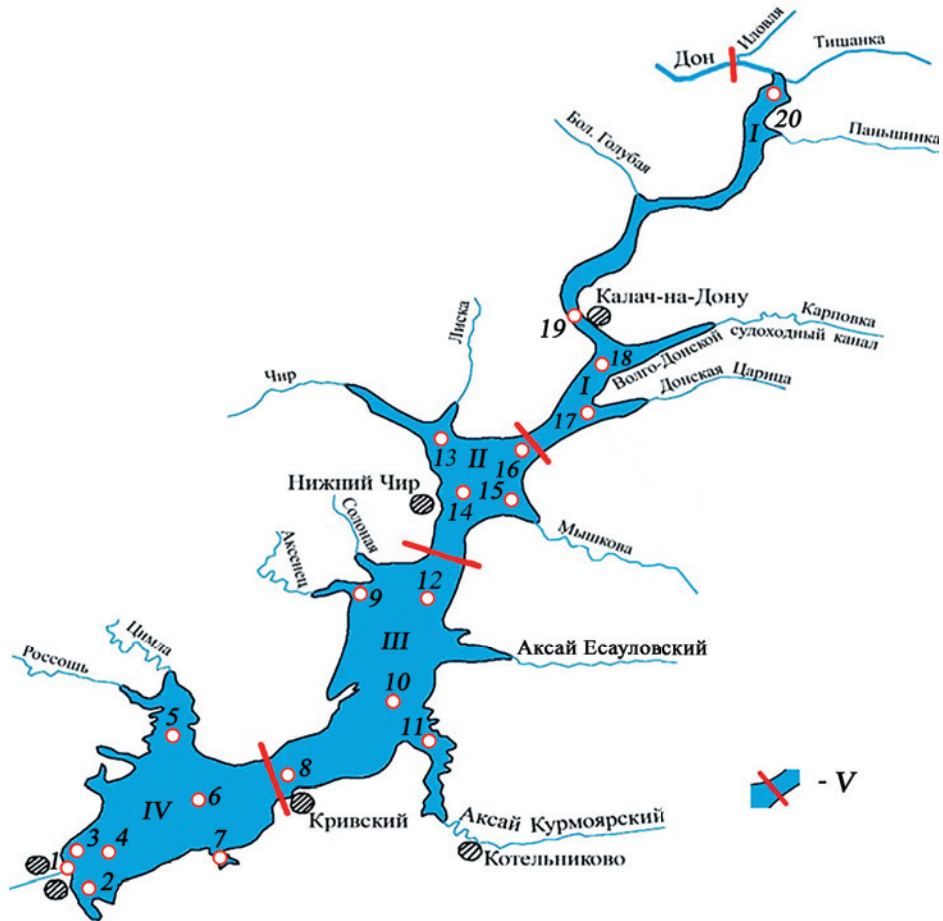


Рисунок. Картограмма расположения станций мониторинга концентраций и потоков метана в Цимлянском водохранилище: I – Калачский участок; II – Чирский участок; III – Центральный участок; IV – Приплотинный участок; V – границы участков.

Figure. Schematic map of the methane concentration and flow monitoring stations' location in the Tsimlyansk reservoir: I – is the Kalach range; II – is the Chir range; III – is the Central range; IV – is the Near-Dam range; V – are the ranges' boundaries.

Отбор проб воды будет выполняться при помощи батометра Молчанова. Донные отложения в точках с глубинами более 1 м отбираться при помощи ударной трубки конструкции ГОИН. Донные отложения в точках с глубинами менее 0,7 м – с помощью специальной трубки диаметром 45 мм и поршнем для выдавливания керна.

Вертикальное зондирование водной толщи с определением температуры, электропроводности воды, содержания растворенного кислорода планируется производить с помощью мультипараметрических зондов, прозрачность воды – по диску Секки. Количественное определение растворенного органического углерода – методом высокотемпературного окисления с использованием анализатора углерода.

Отбор, транспортировка, хранение проб воды и донных отложений и последующее определение CH_4 будут проведены согласно аттестованным методикам^{3,4}. Измерение CH_4 выполнено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Параллельно с отбором проб на метан будет отбираться навеска отложений для определения массовой доли сухого веса, их влажности и плотности. Величины Eh и pH донных отложений будут измерены с помощью электродов портативного pH метра иономера – «Экотест 2000».

Определение удельных потоков метана с поверхности воды Цимлянского водохранилища будет выполняться камерным методом с помощью накопительных камер – ловушек [3, 22]. Экспозиция ловушек в накопительном режиме составит в среднем 20 мин. Удельный поток CH_4 будет рассчитываться по скорости изменения их концентрации в воздушной фазе камер с учетом «холостых» проб, отбираемых сразу после установки ловушек (экспозиция 0 минут). Определение концентрации CH_4 в воздушной фазе ловушек будет проведено газохроматографическим методом с помощью методических приемов, описанных в работах [2, 3].

2. Для оценки вклада прибрежно-водной растительности в общую эмиссию CH_4 с Цимлянского водохранилища в разные вегетационные периоды (начало, пик и конец вегетации) запланировано измерение удельных потоков и стоков CH_4 над зарослями доминирующих растительных сообществ. В основном, это обладающие аэренхимой тростник южный и рогозы [23]. Стандартный метод оценки скорости выделения метана растением подразумевает герметизацию целого растения или его частей в закрытых камерах (или газонепроницаемых мешках) и последующее измерение концентрации метана в камере через определенный промежуток времени [3]. Определение площади зарастания прибрежных зон в Цимлянском водохранилище для последующего расчета суммарной эмиссии CH_4 растительностью будет рассчитано по космоснимкам с корректировкой ареалов распространения в ходе наземных экспедиционных исследований.

3. Для оценки вклада зон осушки в общую эмиссию CH_4 с Цимлянского водохранилища в период низкого уровня воды планируется провести измерения удельных потоков CH_4 в зоне осушки на разнотипных по литологическому составу обнажившихся грунтах (пески, илы). Определение площади осушаемых грунтов будет проведено по космоснимкам и батиметрическим картам.

4. В летний период необходимо провести суточные наблюдения за удельными эмиссионными потоками и стоками CH_4 как на удаленной от берега, так и на прибрежной станциях Калачского и Приплотинного участков с интервалом в три часа. Установленные особенности суточной динамики эмиссии CH_4 будут учтены при расчете его суммарных годовых эмиссионных потоков и стоков в Цимлянском водохранилище.

³ РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2012. 23 с.

⁴ РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2013. 19 с.

5. На удаленных от берега станциях суточных наблюдений с помощью седиментационных ловушек будут отобраны пробы взвешенного вещества для изучения объемов его осаждения в течение суток, а также определения содержания органического вещества, минерального и гранулометрического составов, что позволит оценить скорости осадконакопления и объема поступления в донные отложения органического вещества для расчета его баланса.

6. В результате проведенных работ планируется разработать и создать ГИС-проект и цифровой банк пространственных данных, содержащий информацию о гидрометеорологических и гидрологических условиях, гидрохимических показателях воды и донных отложениях в разные гидрологические фазы, а также удельных потоках и стоках CH_4 на границе «вода – атмосфера» на различных участках Цимлянского водохранилища.

7. Далее необходимо проанализировать влияние различных природных и антропогенных факторов и процессов, в т. ч. режима эксплуатации Цимлянского водохранилища на концентрации CH_4 , а также потоки и стоки CH_4 в системе «донные отложения – вода – атмосфера». Для этого следует выполнить статистическую обработку, обобщение и анализ данных, полученных в ходе вышеописанных работ, а также провести корреляционный анализ блока данных для изучения связи потоков и стоков CH_4 в системе «вода – атмосфера» с измеряемыми гидрохимическими показателями в воде и донных отложениях, а также глубиной и гранулометрическим составом осадков.

Полученные в результате вышеперечисленных работ данные позволят:

- создать на примере Цимлянского водохранилища ансамбль концептуальных балансовых моделей потоков O_2 , CO_2 и CH_4 ;
- рассчитать баланс органического вещества в Цимлянском водохранилище;
- провести расчет суммарных годовых эмиссий и стоков CH_4 в Цимлянском водохранилище и их баланса с оценкой вклада: прибрежных зон, заросших и не заросших растительностью; зон осушки; сброса вод водохранилища в нижний бьеф;
- определить ключевые факторы, влияющие на формирование эмиссионных потоков и стоков CH_4 и его баланс в Цимлянском водохранилище;
- создать концептуальные модели, описывающие причинно-следственные связи между эмиссионными потоками и стоками CH_4 и ключевыми природными и антропогенными факторами, воздействующими на экосистему Цимлянского водохранилища;
- на основе концептуальных моделей создать математические модели, позволяющие моделировать динамику эмиссии и поглощения CH_4 в Цимлянском водохранилище;
- разработать рекомендации по организации и ведению мониторинга за эмиссией CH_4 в водохранилищах, расположенных в степной зоне России;
- разработать и внедрить новые и модифицировать имеющиеся образовательные программы с целью подготовки научных и педагогических кадров в области разработки и испытания технологий контроля баланса климатически активных газов.

ВЫВОДЫ

Выполненный анализ факторов и процессов трансформации ОВ в воде и донных отложениях в чаше водохранилища однозначно указывает на доминирующую роль в образовании парниковых газов внутриводоемных процессов при участии внешних источников, находящихся на территории водосборного бассейна. Водная толща является транзитным резервуаром, нижняя граница которого граничит с донными отложениями, а верхняя с атмосферой. Именно с поверхности акватории, за исключением случаев его частичного или полного обмеления, происходит выделение основной массы CO_2 , CH_4 в атмосферу, объемы которых в соответствии с идеологией борьбы с изменением климата, мы планируем не только изучить, но и разработать в будущем предложения по методике оценки эмиссии CH_4 и ее сокращению. Поступающее в чашу водохранилища из различных источников ОВ является доминирующим фактором, который определяет направленность и биохимические механизмы образования климатически активных газов, в то время как гидрологический и гидрохимический режимы способны оказывать на их производство косвенное влияние. Также является, хотя и очевидной, но недостаточно изученной роль ОВ различного происхождения и состава в генерации метана.

Проблема прогнозирования и сокращения выбросов CH_4 Цимлянского водохранилища, как и других ему подобных, не может быть решена без детального изучения особенностей функционирования этой аквальной экосистемы во времени и пространстве, а именно, внутриводоемных факторов и процессов, и влияния на них сочетанных гидрологических событий на водосборах. Предложен подробный план экспедиционных и экспериментальных работ, направленных на установление вклада ключевых факторов, влияющих на формирование удельных потоков и стоков CH_4 и его баланс, а также оценку суммарной годовой эмиссии CH_4 из Цимлянского водохранилища.

Только после проведения полного цикла сезонных экспедиционных работ и получения репрезентативных гидрологических, биологических и гидрохимических результатов, станет возможной разработка и создание адекватной модели формирования потоков метана и предложений по их сокращению в Цимлянском водохранилище.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. WMO. WMO greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2018 // Proceedings of the Global Atmosphere Watch, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 25 November 2019.
2. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. Ростов на-Дону, М., 2007. 330 с.
3. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Мельников Е. В. Эмиссия метана рисовыми полями Ростовской области // Почвоведение. 2023. № 8. С. 889–902.
4. Rocher-Ros, G.; Stanley, E.H.; Loken, L.C.; Casson, N.J.; Raymond, P.A.; Liu, S.; Amatulli, G.; Sponseller, R.A. Global methane emissions from rivers and streams. *Nature*. 2023. 621. P. 530–535.
5. Henriette I. Jager, Rachel M. Pilla, Carly H. Hansen, Paul G. Matson, Bilal Iftikhar † and Natalie A. Griffiths Understanding How Reservoir Operations Influence Methane Emissions: A Conceptual Model // *Water*. 2023. 15. 4112.

6. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Mechanistic Modeling of the Variability of Methane Emissions from an Artificial Reservoir // *Water*. 2024. 16(1):76. DOI: org/10.3390/w16010076.
7. Barros N.; Cole J.J.; Tranvik L.J.; Prairie Y.T.; Bastviken D.; Huszar V.L.M.; del Giorgio P.; Roland F. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude // *Nature Geoscience*. 2011. 4. P. 593–596.
8. Felix-Faure J., Gaillard J., Descloux S., Chanudet V., Poirel A., Baudoin J.M., Avrillier J.N., Millery A., Dambrine E. Contribution of flooded soils to sediment and nutrient fluxes in a hydropower reservoir (Sarrans, Central France) // *Ecosystems*. 2019. 22. P. 312–330.
9. Хрусталеv Ю.П. Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. Л.: Наука, 1989. 260 с.
10. Студеникина Е.И., Толоконникова Л.И., Воловик С.П. Микробиологические процессы в Азовском море в условиях антропогенного воздействия. М.: ФГУП «Нацрыбресурсы», 2002. 188 с.
11. Федоров Ю.А., Косолапов А.Е., Беляев А.И., Гарькуша Д.Н., Усова Е.В., Крукиер М.А., Тамбиева Н.С., Дмитрик Л.Ю., Ковалев Е.А. Экспериментальные исследования концентраций и потоков метана в аквальных экосистемах (с элементами моделирования) как теоретико-методологическая основа для создания карбонового полигона // Сб. трудов Всерос. научно-практ. конф. с между. уч. «Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг». Т. 1. Южный федеральный университет. Новочеркасск: Лик, 2023. С. 29–39.
12. Вавилин В.А., Рытов С.В., Локшина Л.Я. Баланс между гидролизом и метаногенезом при анаэробном разложении органического вещества // *Микробиология*. 1997. Т. 66. № 6. С. 846–851.
13. Кузнецов С.И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Изд-во «Наука», 1970. 440 с.
14. Winfrey M.R., Zeikus I.G. Effect of sulphate on carbon and electron flow during microbial methanogenesis in freshwater sediments // *Applied and Environmental Microbiology*. 1977. Vol. 22. № 2. P. 275–281.
15. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. Метан как показатель экологического состояния пресноводных водоемов (на примере озер Валдай и Ужин) // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 6. С. 88–96.
16. Wang, Chunlin, Yuhan Xv, Siyue Li, and Xing Li. 2023. «Interconnected River–Lake Project Decreased CO₂ and CH₄ Emission from Urban Rivers» // *Water*. 15. No. 11: 1986.
17. Федоров Ю.А. К вопросу о классификации лечебных грязей—Экологические проблемы // Взгляд в Будущее: сб. трудов VIII Международной научно-практической конференции (БП и и СОТ «Витязь»—БП и СОТ «Лиманчик» 8–11 сентября; 2017) / Южный федеральный университет / под. ред. Ю.А. Федорова. Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2017. С. 447–456.
18. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Крукиер М.А. Температура и ее влияние на эмиссию метана из водных объектов (по результатам экспериментального и математического моделирования) // *Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион*. 2012. № 6. С. 99–101.
19. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища: распределение и биогеохимические особенности образования // Деп. в ВИНИТИ РАН 02.06.99. № 1756-В-99. Ростов-на-Дону, 1999. 82 с.
20. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykossov V., Vesala T. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geo/ scientific. Model Development*. 2016. 9. P. 1977–2006.
21. Stepanenko, V.; Valerio, G.; Pilotti, M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems Impact Factor, Indexing, Ranking*. 2020. 12. e21063.
22. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 6. С. 48–58.

23. Калинина С.Г. Эколого-флористический и рыбохозяйственный аспект высшей водной растительности Цимлянского водохранилища // Сб. статей III Межд. научно-практ. конф. «Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов». М.: Планета, 2013. С. 416–430.

REFERENCES

1. WMO. WMO greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2018. *Proceedings of the Global Atmosphere Watch*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 25 November 2019.
2. Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N., Khoroshevskaya V.O. Methane in aquatic ecosystems. 2nd edition, revised and supplemented. Rostov-na-Donu, M., 2007. 330 c.
3. Garkusha D.N., Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Melnikov E.V. Methane emission by rise fields of Rostov Oblast. *Soil science*. 2023. No. 8. P. 889–902.
4. Rocher-Ros, G.; Stanley, E.H.; Loken, L.C.; Casson, N.J.; Raymond, P.A.; Liu, S.; Amatulli, G.; Spon-seller, R.A. Global methane emissions from rivers and streams. *Nature*. 2023. 621. 530–535.
5. Henriette I. Jager, Rachel M. Pilla, Carly H. Hansen, Paul G. Matson, Bilal Iftikhar † and Natalie A. Griffiths Understanding How Reservoir Operations Influence Methane Emissions: A Conceptual Model. *Water*. 2023. 15. 4112.
6. Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I. Mechanistic Modeling of the Variability of Methane Emissions from an Artificial Reservoir. *Water*. 2024. 16(1):76. <https://doi.org/10.3390/w16010076>
7. Barros N.; Cole J.J.; Tranvik L.J.; Prairie Y.T.; Bastviken D.; Huszar V.L.M.; del Giorgio P.; Roland F. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geo-science*. 2011. 4. P. 593–596.
8. Felix-Faure J., Gaillard J., Descloux S., Chanudet V., Poirel A., Baudoin J.M., Avriillier J.N., Millery A., Dambrine E. Contribution of flooded soils to sediment and nutrient fluxes in a hydropower reservoir (Sarrans, Central France). *Ecosystems*. 2019. 22. P. 312–330.
9. Khrustalev Y.P. Laws of sediments accumulation in inland seas of the arid zone. L.: Nauka, 1989. 260 p.
10. Studenikina E.I., Tolokonnikova L.I., Volovik S.P. Microbiological processes in the Sea of Azov in the conditions of anthropogenic impact. M.: Natsrybresursy, 2002. 188 p.
11. Fedorov Y.A., Kosolapov A.E., Belayev A.I., Garkusha D.N., Usova E.V., Krukier M.L., Tambieva N.S., Dmitrik L.Y., Kovalev E.A. Experimental studying of the methane concentrations and flows in aquatic ecosystems (with some elements of modelling) as a theoretical/methodical basis for establishment of a carbon ground. *Proceedings of "Water resources in the conditions of global chal-lenges: ecological problems, management, monitoring" scientific/practical international conference*. Vol. 1. Southern Federal University. Novochoerkassk: Lik, 2023. P. 29–39.
12. Vavilin V.A., Rytov S.V., Lokshina L.Y. The balance between hydrolyze and methane genesis in organic matter anaerobic decomposition. *Microbiology*. 1997. Vol. 66. No. 6. P. 846–851.
13. Kuznetsov S.I. Micro/flora of lakes and its geo/chemical activities. L.: Izd-vo Nauka, 1970. 440 p.
14. Winfrey M.R., Zeikus I.G. Effect of sulphate on carbon and electron flow during microbial methanogenesis in freshwater sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. 1977. Vol. 22. № 2. P. 275–281.
15. Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N. Methane as an indicator of the fresh water bodies' ecological status (the lakes Valday and Uzhin as examples). *Meteorology and hydrology*. 2004. No. 6. P. 88–96.
16. Wang, Chunlin, Yuhan Xv, Siyue Li, and Xing Li. 2023. «Interconnected River–Lake Project De-creased CO₂ and CH₄ Emission from Urban Rivers». *Water*. 15. No. 11: 1986.
17. Fedorov Y.A. On the issue of the therapeutic muds classification – Ecological problems. Vzgl'yad v budushchey. *A view into the Future. Proceedings of VIII International scientific/practical conference "Vityaz" and "Limanchik", September 8-11, 2017*. Southern Federal University. Edited by Y.A. Fedorov. Rostovna-na-Donu, Taganrog: Publishing House of Southern Federal University, 2017. P. 447–456.
18. Fedorov Y.A., Garkusha D.N., Krukner M.L. Temperature and its influence upon the methane mission from water bodies (according to the experimental and mathematic modelling results). Universities' newsletters. Northern Caucasus Region. 2012. No. 6. P. 99–101.
19. Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Garkusha D.N., Khoroshevskaya V.O. Methane in the Tsimlyansk reservoir water and bottom sediments: distribution and bio/geo/chemical special features of for-mation. Deposited in VINITI RAN 02.06.99. No. 1756-B-99. Rostov-na-Donu, 1999. 82 p.

20. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykossov V., Vesala T. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geo/scientific Model Development*. 2016. 9. P. 1977–2006.
21. Stepanenko, V.; Valerio, G.; Pilotti, M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems Impact Factor, Indexing, Ranking*. 2020. 12, e21063.
22. Garkusha D.N., Fedorov Y.A., Tambieva N.S. Calculation of the methane balance elements in the Sea of Azov and the World Ocean aquatic ecosystems based on empiric formulas. *Meteorology and hydrology*. 2016. No. 6. P. 48–58.
23. Kalinina S.G. Ecological/floristically and fishery aspect of supreme aquatic vegetation of the Tsimlyansk reservoir. *Collection of articles of III International scientific/practical conference "Studying, preservation and restoration of natural landscapes"*. M.: Planeta, 2013. P. 416–430.

Сведения об авторах:

Юрий Александрович Федоров, д-р геогр. наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Рихарда Зорге, д. 40; ORCID: 0000-0001-7411-3030; e-mail: fedorov@sfedu.ru

Дмитрий Николаевич Гарькуша, канд. геогр. наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Рихарда Зорге, д. 40; ORCID: 0000-0001-5026-2103; e-mail: gardim@sfedu.ru

Алексей Евгеньевич Косолапов, д-р техн. наук, профессор, директор ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID: 0000-0001-2345-6789, e-mail: akosol@mail.ru

Усова Елена Валентиновна, заведующая отделом исследования качества вод и аналитической деятельности, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID: 0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Анпилова Евгения Леонидовна, канд. хим. наук, гидрохимик 1 категории, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID: 0009-0009-2196-809X, e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Верещагин Михаил Алексеевич, гидрохимик 1 категории, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, Ченцова, здание 10а; ORCID: 0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Беляев Александр Иванович, д-р с.-х. наук, профессор, директор ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения российской академии наук», Россия, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, д. 97; ORCID: 0000-0001-8077-7052; e-mail: director@vfanc.ru

About the authors:

Yuriy A. Fedorov, Professor, Doctor of Geographic Sciences, Head, Chair of Physical Geography, Ecology and Nature Protection. Institute of Earth Sciences, Southern Federal University; ul. Rikharda Zorge, 40. Rostov-na-Donu, 344090, Russia; ORCID: 0000-0001-7411-3030; e-mail: fedorov@sfedu.ru

Dmitry N. Garkusha, Associate Professor, Candidate of Geographic Sciences, Chair of Physical Geography, Ecology and Nature Protection. Institute of Earth Sciences, Southern Federal University; ul. Rikharda Zorge, 40. Rostov-na-Donu, 344090, Russia; ORCID: 0000-0001-5026-2103; e-mail: gardim@sfned.ru

Aleksey E. Kosolapov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0000-0001-2345-6789, e-mail: akosol@mail.ru

Elena V. Usova, Head, Department of Water Quality Investigation and Analytical Activities, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Evgenia L. Anpilova, Candidate of Chemical Sciences, 1 category Hydro/chemistry Expert, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0009-0009-2196-809X, e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Mikhail A. Vereshchagin, 1 category Hydro/chemistry Expert, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Aleksandr I. Belyaev, Professor, Doctor of Geographic Sciences, Director, Federal Scientific Center of Agro/ecology, Integrated Land-reclamation and Protective Forestry of the Russian Academy of Sciences, pr-t Universitetskii, 97, Volgograd, 400062, Russia; ORCID: 0000-0001-8077-7052; e-mail: director@vfanc.ru

Межгодовые изменения содержания органического вещества и биогенных элементов в водохранилищах Нижней Волги: влияние климатической трансформации

Е.А. Шашуловская  , С.А. Мосияш 

 shash.elena2010@yandex.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение динамики органического вещества и биогенных элементов – показателей, обуславливающих качество воды водоемов комплексного назначения, в условиях возросшей экстремальности климата приобретает особое значение при разработке и принятии решений по адаптации водохозяйственного комплекса России к изменению условий окружающей среды. **Методы.** Для исследования использованы полученные авторами данные гидрохимического режима Саратовского и Волгоградского водохранилищ за период 2001–2022 гг. **Результаты.** В условиях глобальной макроклиматической трансформации (изменения термического режима, внутригодового перераспределения водного стока и уменьшения количества осадков) выявлена тенденция снижения величин показателей, связанных с водностью, – цветности, перманганатной окисляемости и аммонийного азота. Повышение летней температуры воды способствует увеличению содержания легкоокисляемого органического вещества вследствие роста продуктивности автотрофов. В Волгоградском водохранилище, как более трофном, колебания концентраций общего и легкоокисляемого органического вещества происходили на более высоком уровне, чем в Саратовском. Повышение зимней приземной температуры воздуха может быть основной причиной снижения концентрации аммонийного азота и повышения содержания железа. Динамика нитратов и фосфатов связана с варьированием индекса Северо-Атлантического колебания (САК), являющегося маркером глобальных атмосферных процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: органическое вещество, биогенные элементы, водный сток, Саратовское и Волгоградское водохранилища, индекс САК, изменение климата.

Для цитирования: Шашуловская Е.А., Мосияш С.А. Межгодовые изменения содержания органического вещества и биогенных элементов в водохранилищах Нижней Волги: влияние климатической трансформации // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 83–100. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-83-100.

Дата поступления 05.02. 2024.

Interannual changes in the content of organic matter and biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga: the influence of climatic transformation

Elena A. Shashulovskaya  , Svetlana A. Mosiyash 

 shash.elena2010@yandex.ru

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

ABSTRACT

Relevance. The study of the dynamics of organic matter and biogenic elements – indicators that determine the water quality of reservoirs of complex purpose, in conditions of increased

© Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., 2024

climate extremes, is of particular importance in developing and making decisions on the adaptation of the Russian water management complex to changing environmental conditions. **Methods.** The data obtained by the authors from the hydro/chemical regime of the Saratov and Volgograd reservoirs for the period 2001-2022 were used for the study. **Results.** Under the conditions of global macroclimatic transformation (changes in the thermal regime, intra-annual redistribution of water runoff and decrease in precipitation), a tendency has been revealed to decrease the values of indicators related to water content: chromaticity, permanganate oxidability and ammonium nitrogen. An increase in summer water temperature contributes to an increase in the content of easily oxidizable organic matter due to an increase in the productivity of autotrophs. In the Volgograd reservoir, as a more trophic one, fluctuations in the concentrations of total and easily oxidized organic matter occurred at a higher level than in the Saratov one. An increase in winter surface air temperature may be the main reason for a decrease in ammonium nitrogen concentration and an increase in iron content. The dynamics of nitrates and phosphates is associated with fluctuations in the North Atlantic Oscillation Index (NAO), which is a marker of global atmospheric processes.

Keywords: organic matter, biogenic elements, water runoff, Saratov and Volgograd reservoirs, NAO index, climate change.

For citation: Shashulovskaya E.A., Mosiash S.A. Interannual changes in the content of organic matter and biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga: the influence of climatic transformation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 83–100. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-83-100.

Received 05.02. 2024.

ВВЕДЕНИЕ

Саратовское и Волгоградское водохранилища – замыкающие природно-техногенные водоемы комплексного назначения в огромном Волжском каскаде. Они являются транспортными артериями, используются для целей энергетики, водоснабжения, ирригации и рыбного хозяйства. Расположенные в индустриально развитом регионе за свои более чем полувековые периоды эксплуатации Саратовское и Волгоградское водохранилища стали аккумуляторами многих химических веществ природного и антропогенного происхождения. На качество воды оказывает влияние не только транзит загрязняющих веществ из вышерасположенных водохранилищ, но и сброс от точечных и диффузных источников на водосборе.

Трансформация климата последних десятилетий приводит к изменениям компонентов гидрологического цикла, прежде всего, водного стока, зависящего от увлажненности региона [1]. На фоне роста количества осадков над сушей в средних широтах в течение последних десятилетий наблюдается увеличение повторяемости и интенсивности засух на юге Европейской территории России (ЕТР). В бассейнах Днепра, Дона и Нижней Волги в начале XXI в. зарегистрировано снижение объема водного стока, чаще наблюдаются маловодные годы [2]. Маловодье наносит вред не только судоходству, водоснабжению и гидроэнергетике, но и может привести к существенной трансформации водных экосистем, нарушая их природную самоочищающую способность.

Начало XXI в. характеризуется увеличением температур приземного воздуха – главного индикатора изменения климата [3]. Рост приземной температуры на территории России в последние десятилетия происходит в два раза быстрее, чем в среднем по планете [3], как следствие – возрастает температура поверхностных вод. В водохранилищах р. Волги с 1970-х годов отмечена устойчивая тенденция к повышению летней температуры воды [4–6]. Увеличение температуры воды удлиняет вегетационный период, увеличивает оборачиваемость питательных веществ и приводит к усилению процессов эвтрофирования [7, 8].

Из крупномасштабных циркуляционных систем наибольший интерес для климата России представляет Северо-Атлантическое колебание (САК), сущность которого заключается в перераспределении атмосферных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой. В исследованиях последних десятилетий предпринята попытка оценить влияние САК на погоду и климат Европы [9–11]. Чередования положительных и отрицательных фаз САК вызывают большие изменения в ветровом режиме, переносах тепла и влаги, траекториях и интенсивности циклонической деятельности.

Для оценки продукционного и самоочищающего потенциала водных систем в условиях климатических изменений необходимы теоретические представления о механизмах их функционирования. Главными факторами, обуславливающими качество воды в водных объектах и определяющими условия существования гидробионтов и общую продуктивность природных вод, является содержание органического вещества (ОВ) и биогенных элементов (БЭ). Их концентрации подвержены существенным пространственно-временным изменениям, тесно связаны с жизнедеятельностью организмов различного трофического уровня и обусловлены многими природными факторами. Изучение динамики этих компонентов необходимо для прогнозирования возможных изменений гидрохимического режима в зависимости от меняющихся условий среды. Контроль качества водных ресурсов в условиях возрастающей экстремальности климата, наблюдаемой в последние десятилетия, приобретает особое значение при разработке и принятии решений по адаптации водохозяйственного комплекса России к изменению климата [12].

В связи с вышеизложенным, целью данного исследования стал анализ многолетних изменений содержания органического вещества и биогенных элементов, определение тенденций их динамики в воде водохранилищ Нижней Волги в начале XXI в. в условиях климатических изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Замыкающие водохранилища Волжского каскада – Саратовское и Волгоградское (шестая и седьмая ступени соответственно) – расположены в основном в лесостепной и степной зонах, общая протяженность искусственных водоемов около 900 км [13]. Это крупные (площадь зеркала соответственно ~1830 и 3120 км²) и относительно неглубокие (средняя глубина 7 и 10 м) водохранилища. Интенсивность водообмена в Саратовском водохранилище 8–19 [14], в Волгоградском – 7,5 раз в год [15]. Основная часть водного баланса Саратовского и Волгоградского водохранилищ приходится на сток р. Волги, доля

боковой приточности составляет, соответственно, ~2 % и < 1 % [15]. Уровненный режим – относительно постоянный, только в период половодья в апреле-мае наблюдается резкий подъем уровня воды.

Гидрохимический материал для исследования отобран в 2001–2022 гг. на русловых и прибрежных участках Саратовского и Волгоградского водохранилищ с помощью батометра Руттнера. Картосхема расположения стандартных мониторинговых разрезов представлена в ранее опубликованных работах [5, 6]. Отбор проб проводили в течение вегетационного сезона: весной (апрель-май), летом (июль- август) и осенью (октябрь-ноябрь). На русловых участках пробы отбирали с поверхностного и придонного (0,5 м от дна) горизонтов, на прибрежных – только с поверхности. Всего было проанализировано около 2700 проб. Для определения содержания органического вещества (цветности, перманганатной (ПО) и бихроматной (ХПК) окисляемости, биохимического потребления кислорода (БПК₅)) и биогенных элементов (минеральных форм азота и фосфора, общего железа, кремния) использовали общепринятые методики титриметрического и фотометрического анализов [16]. Объем водного стока оценивали по данным сброса через Саратовский и Волжский гидроузлы, доступным на сайте ПАО «Русгидро»¹. Высокая проточность Саратовского водохранилища, а также последовательное расположение исследуемых водоемов в одном каскаде обусловили высокий коэффициент корреляции между объемами пропущенной через них воды ($r = 0,98$ при $p < 0,05$). Величины стока половодья рассчитывали по данным за апрель и май. Трансформированные ряды значений индекса САК доступны на сайте².

Для статистической обработки данных (расчета средних значений показателей, ошибок, коэффициентов корреляции Спирмена r и детерминации R^2) использовали специализированный пакет Statgraf Centurion XVI, для построения графиков – стандартные программы для персонального компьютера. При анализе результатов выделяли средние за вегетационный сезон концентрации, при этом многолетние данные разделили на два периода в соответствии с динамикой индекса САК.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В связи со сложным многокомпонентным воздействием факторов среды на экосистемы водоемов в публикациях последних лет большое внимание уделяется глобальным атмосферным процессам, маркером которых является индекс САК [17–20]. Северо-Атлантическое колебание – одна из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы в северном полушарии. Оно выражено во все сезоны года и проявляется в масштабах от нескольких суток до нескольких столетий. При положительных значениях САК зимы становятся мягче, количество осадков увеличивается. В периоды с отрицательными значениями САК наблюдаются похолодание и уменьшение количества осадков. Чередование фаз положительных и отрицательных значений определяет температуру воды, ле-

¹ ПАО «Русгидро». Режим доступа: rushydro.ru (дата обращения 18.12.2023).

² National Weather Service, Climate Prediction Center, USA. Web page. URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml> (дата обращения: 17.01.2024).

довый режим водоемов, интенсивность перемешивания воды [20]. С динамикой САК согласуются основные последствия современной трансформации климата для водоемов Европейской территории России, которые проявляются в изменении температуры воды и количества осадков над водосборной площадью [19].

В 2001–2022 гг. в динамике САК отмечено два периода: уменьшение индекса с 2001 по 2010 гг. до минимальных значений (-13,83) в 2010 г., с 2011 г. наметилась тенденция к возрастанию. С динамикой индекса согласуются изменения водного стока: в 2001–2010 гг. отмечен отрицательный тренд ($R_2 = 0,39$, $p = 0,05$), с 2011 по 2022 гг. наблюдалось некоторое увеличение его объема. Колебания годового водного стока исследуемых водоемов в период 2001–2022 гг. происходили в интервале 195–299 км³ (табл. 1). В 2011–2022 гг., по сравнению с первым десятилетием XXI в., наблюдалось сокращение расхода весеннего половодья, связанное с ростом зимних температур приземного воздуха и увеличением дренирующих свойств почв. Внутригодовое перераспределение водного стока отмечено на большинстве рек Европейской территории России [2], а на водохранилищах дополнительное влияние может оказывать работа гидроэлектростанций.

На территории Средней Волги, являющейся основной стокоформирующей зоной исследуемых искусственных водоемов, зарегистрирован рост зимних температур приземного воздуха, особенно заметный с 2011 г., что отражает общую тенденцию, характерную в начале XXI в. для территории европейской части России [1, 6, 21]. В водохранилищах Волги отмечен рост летних температур воды. Так, в Куйбышевском водохранилище в последние годы наметилась устойчивая тенденция повышения температуры поверхностного слоя воды на 1,6 °С по сравнению с историческим периодом 1957–1980 гг. [22]. В настоящее время на Саратовском водохранилище с 1960–1970-х годов температура воды в июле увеличилась на ~1,3 °С [6], в Волгоградском – на ~2,4°С [5]. Только за прошедшие двадцать два года нового столетия температура воды в июле в нижеволжских водохранилищах повысилась в среднем на 0,4 – 0,8 °С (табл. 1).

Таблица 1. Гидроклиматические характеристики Саратовского и Волгоградского водохранилищ в период 2001–2022 гг.

Table 1. Hydro-climatic characteristics of the Saratov and Volgograd reservoirs in the period 2001–2022

Показатель	Водохранилище			
	Саратовское		Волгоградское	
	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.
Т воды июля, °С	19,4 – 23,5	19,5 – 22,0	21,3 – 26,2	20,8 – 24,9
	20,6 ± 0,6	21,0 ± 0,3	22,3 ± 0,6	23,1 ± 0,4
Годовой сток, км ³	195 – 286	204 – 299	195 – 286	199 – 295
	248 ± 9	248 ± 10	251 ± 10	242 ± 10
Весенний сток, %	25 – 37	24 – 40	26 – 37	24 – 39
	34 ± 1	31 ± 1	33 ± 1	31 ± 1

Примечание: над чертой – пределы колебания показателя, под чертой – среднее значение и его ошибка.

Изменения гидрологического и температурного режима водоемов вследствие климатической трансформации тесно связаны с динамикой основных показателей качества воды гидроэкосистем – ОВ и БЭ. Автохтонное ОВ, образующееся в водных объектах в результате продукционной жизнедеятельности автотрофов, является основным источником легкоокисляемого органического вещества [23].

Пределы колебания содержания легкоокисляемого ОВ, определяемого по пятисуточной экспозиции (БПК₅), в 2001–2022 гг. в Саратовском водохранилище составили 0,9 – 2,7 мгО₂/дм³, в Волгоградском – 1,5 – 3,1 мгО₂/дм³. В течение вегетационного сезона минимальные значения БПК₅ регистрировались при низком уровне продукционных процессов в ранневесенний и позднесенний периоды, максимальные – летом при образовании автохтонного ОВ.

В Волгоградском водохранилище повышенные значения БПК₅ в отдельные годы отмечались и осенью в районе влияния г. Саратова и были, видимо, связаны с локальным поступлением легкоокисляемой органики со сточными водами. В этом же районе отмечены и минимальные величины БПК₅ (<0,5 мг/дм³), что, возможно, было признаком торможения биохимических процессов в результате влияния токсичных веществ антропогенного происхождения. Доля лабильной органики в общем ОВ в 2011–2022 гг. по сравнению с первым десятилетием XXI в. в исследуемых водохранилищах практически не изменилась (табл. 2). В Волгоградском водохранилище колебания показателя БПК₅ в этот период были выражены более отчетливо (рис. 1).

Таблица 2. Содержание органического вещества (средняя концентрация и ее ошибка) в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в вегетационный период 2001–2022 гг.

Table 2. The content of organic matter (average concentration and its error) in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in the growing season 2001–2022

Показатель	Водохранилище			
	Саратовское		Волгоградское	
	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.
Цветность, град.	–	32±2	–	29±2
ПО, мгО/дм ³	8,8±0,4	7,6±0,3	9,0±0,4	7,6±0,3
ХПК, мгО/дм ³	28±3	25±1	29±2	26±1
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	1,6±0,1	1,7±0,2	2,5±0,1	2,1±0,2
БПК ₅ /ХПК, %	5,8±0,5	6,7±0,7	8,9±0,8	8,2±0,6

Примечание: «–» – отсутствие данных.

Аллохтонное ОВ гумусовой природы в основном характеризуют показатели цветности воды и ПО [24]. Интенсивность окраски воды в Саратовском водохранилище колебалась в 2012–2022 гг. от 23 до 44, в Волгоградском водохранилище – от 21 до 37 градусов цветности. При этом средневегетационные значения показателя синхронно изменялись с величиной водного стока водохранилищ: Саратовского – $r = 0,69$ при $p < 0,05$, Волгоградского – $r = 0,58$

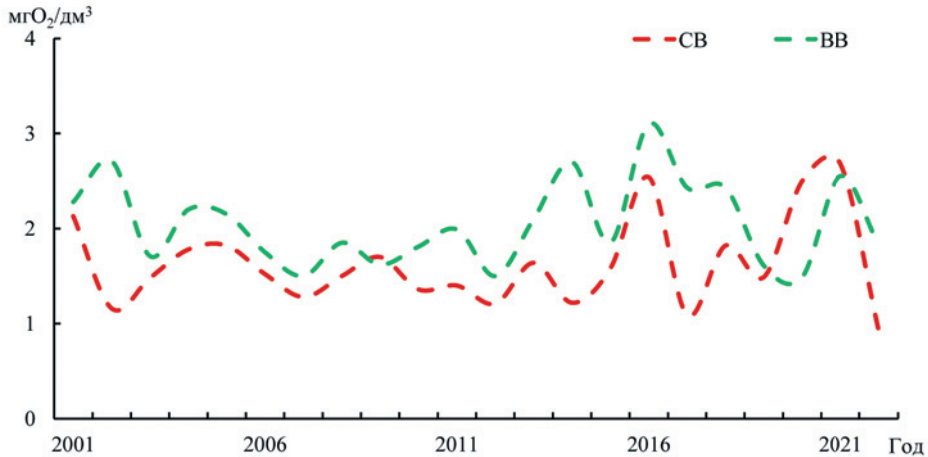


Рис. 1. Динамика БПК₅ в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.: здесь и далее на рисунках СВ – Саратовское водохранилище, ВВ – Волгоградское водохранилище.

Fig. 1. Dynamics of BOD₅ in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022: here and further in Fig. СВ – Saratov reservoir, ВВ – Volgograd reservoir.

при $p < 0,05$. Наиболее сильная связь между величинами цветности воды и объемом стока отмечена в период весеннего половодья. При обильных дождевых паводках повышенные значения цветности регистрировались и летом, и осенью. Вода Саратовского водохранилища более цветная: среднее значение за 2012–2022 гг. – 32 ± 2 град. цветности по сравнению с 29 ± 2 в расположенном ниже по течению Волгоградском водохранилище, что отражает зональные особенности водосборного бассейна Волги с присутствием более окрашенных вод в ее верхней части.

Цветность и ПО связаны значимыми корреляционными отношениями, т. к. характеризуют, главным образом, одни и те же группы органического вещества. В Волгоградском водохранилище наиболее тесная связь между величинами ПО и стока отмечена в зимний и весенний периоды [25]. За исследуемые годы зарегистрированы отрицательные тренды объема стока и величины ПО в период половодья (апрель, май). Колебания ПО в Саратовском водохранилище связаны с изменениями водного стока с коэффициентом корреляции $r = 0,64$, а в Волгоградском, при аналогичном тренде значений, связь между этими показателями слабая ($r = 0,36$), т. к. в отдельные маловодные годы в Волгоградском водохранилище, как более трофном [26], в величину ПО, очевидно, вносит вклад автотонное ОВ. В то же время связь между колебаниями значений ПО для двух водохранилищ аппроксимируется коэффициентом корреляции r равным 0,84. В 2001–2010 гг. зарегистрированы отрицательные тренды водного стока и ПО (рис. 2а), в 2011–2022 гг. колебания этих показателей в водохранилищах происходили синхронно и на одном уровне (рис. 2б).

Содержание общего ОВ по бихроматной окисляемости изменялось в рассматриваемый период в пределах 21–40 мгО/дм³. Средняя величина показате-

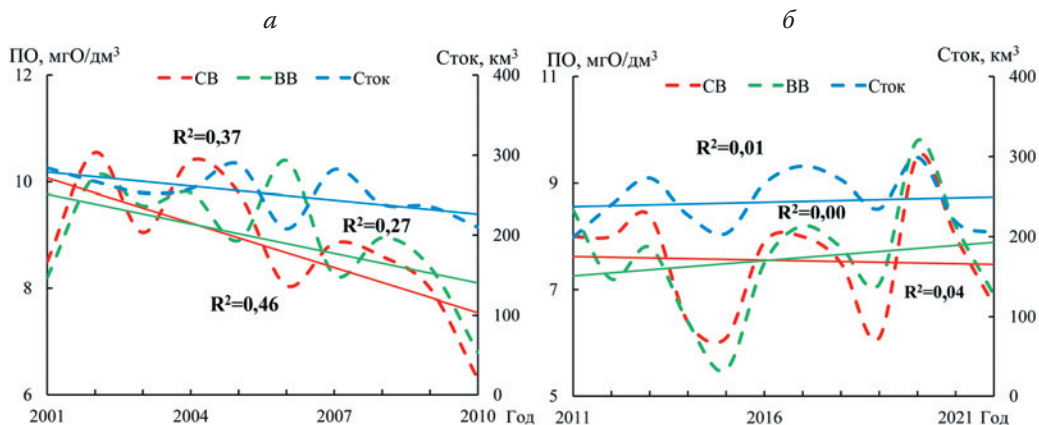


Рис. 2. Динамика ПО в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ и объема годового стока через Волжский гидроузел в 2001–2010 гг.(а) и в 2011–2022 гг.(б): здесь и на рис. 3–6 сплошные линии – основные тренды изменения показателей.
 Fig. 2. Dynamics of PO in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs and the volume of annual runoff through the Volga hydroelectric complex in 2001–2010 (a) and in 2011–2022 (б): here and in Fig. 3–6 solid lines are the main trends in indicators.

ля составила в Саратовском водохранилище – 27 ± 1 мгО/дм³, в Волгоградском – 28 ± 1 мгО/дм³. Колебания величины ХПК в Волгоградском водохранилище, как и величины БПК₅, также происходили на более высоком уровне, но, в отличие от Саратовского, характеризовались отрицательной тенденцией (рис. 3). Межгодовые изменения концентрации общего ОВ в водохранилищах были достаточно согласованны и не связаны с динамикой стока, однако в зимний период в Волгоградском водохранилище содержание общего ОВ, ПО и цветность воды изменялись синхронно с его величиной [25].

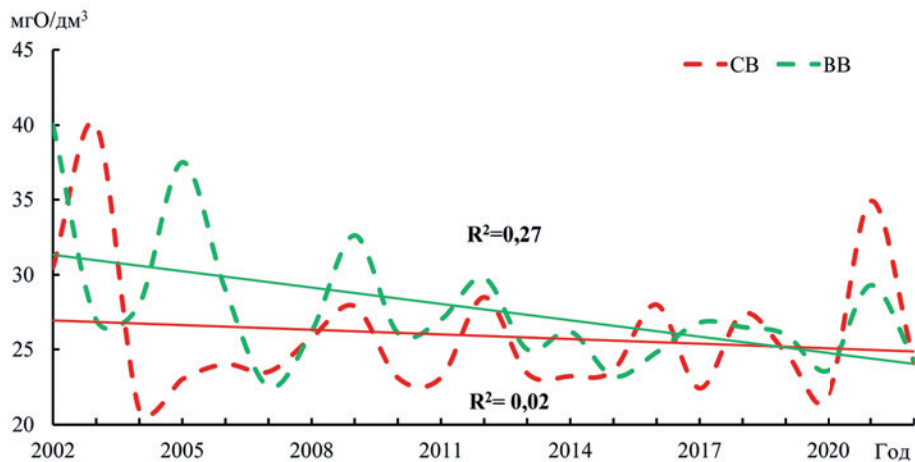


Рис. 3. Динамика содержания общего ОВ в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.
 Fig. 3. Dynamics of total OM content in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022.

Концентрации биогенных элементов за исследуемый период в водохранилищах очень близки (табл. 3). Тенденции их изменения за период исследования позволили предположить определяющий фактор, влияющий на их среднесезонное содержание, и прогнозировать дальнейшую динамику в связи с климатической трансформацией.

Таблица 3. Содержание биогенных элементов (средняя концентрация и ее ошибка) в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в вегетационный период 2001–2022 гг.

Table 3. The content of biogenic elements (average concentration and its error) in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in the growing season 2001–2022

Показатель	Водохранилище			
	Саратовское		Волгоградское	
	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.
N-NH ₄ , мг/дм ³	0,38±0,04	0,21±0,02	0,34±0,04	0,18±0,02
N-NO ₂ , мг/дм ³	0,012±0,002	0,031±0,004	0,015±0,002	0,015±0,003
N-NO ₃ , мг/дм ³	0,50±0,08	0,39±0,04	0,61±0,11	0,40±0,03
P-PO ₄ , мг/дм ³	0,054±0,004	0,047±0,006	0,056±0,004	0,050±0,005
Fe, мг/дм ³	0,15±0,02	0,26±0,02	0,16±0,01	0,22±0,01
Si, мг/дм ³	3,6±0,5	3,3±0,1	4,7±0,5	3,3±0,1

В период 2001–2022 гг. в нижневолжских водохранилищах наблюдалось снижение содержания аммонийного азота (рис. 4 а). Более низкая концентрация аммония в начале XXI в. отмечена в воде Ириклинского (на р. Урал) и верхневолжского Ивановского водохранилищ, в искусственных водоемах Днепровского каскада [5, 20, 21]. Динамика этого показателя характеризуется отрицательным линейным трендом и имеет коэффициент детерминации

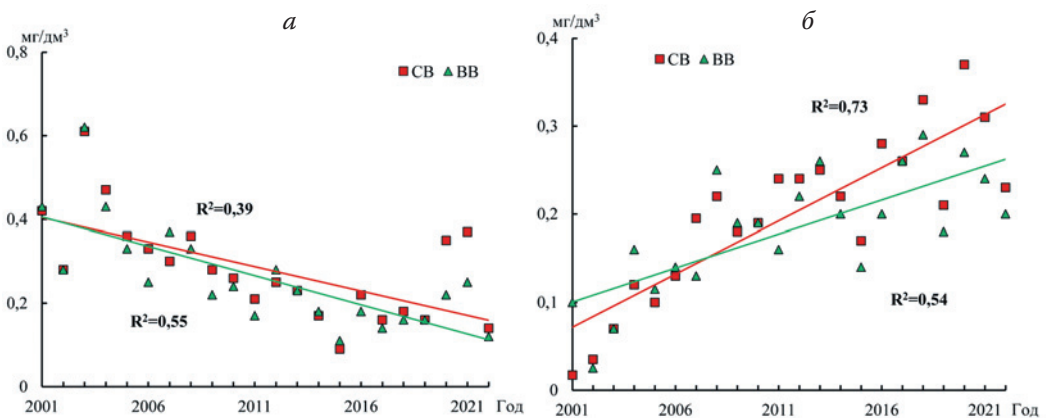


Рис. 4. Динамика аммонийного азота (а) и общего железа (б) в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.

Fig. 4. Dynamics of ammonium nitrogen (a) and total iron (b) in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022.

R^2 для Волгоградского водохранилища – 0,55, для Саратовского – 0,39 (при $p < 0,05$). Одной из причин отрицательного тренда концентрации аммонийного азота, возможно, является снижение объема весеннего притока, связанного с климатической трансформацией. Другими возможными факторами, влияющими на концентрацию ингредиента, могут быть более активное вовлечение азота в биогеохимические циклы и ускорение процессов денитрификации при повышении температуры воды и снижении концентрации кислорода [29, 30]. Также возможно стимулирование денитрификации бактериями терригенного гумуса [31], количество которого в Волгоградском водохранилище увеличилось в результате зимнего потепления [5].

Линейным положительным трендом в исследуемый период в нижеволжских водохранилищах характеризуется динамика железа (рис. 4б). Увеличение количества оттепелей и жидких осадков в зимний период приводит к возрастанию объема вод, богатых гумусовым веществом с большим содержанием природного железа, поступающих из водохранилищ Верхней Волги и р. Камы [32]. С 2011 г. отмечена синхронность колебаний содержания этого элемента с водным стоком в вегетационный сезон в обоих водохранилищах ($r=0,63-0,65$, $p=0,02$). Весной наблюдались максимальные концентрации железа и зарегистрирована высокая корреляционная связь этого элемента и цветности воды ($r=0,85-0,88$, $p < 0,05$) [32]. В последние десятилетия увеличение концентрации железа отмечается и в других водных объектах, расположенных на заболоченных территориях северных регионов мира, где с водосбора в водотоки и водоемы поступает большое количество ОВ гумусовой природы [33].

Нитраты являются доминирующей формой минерального азота в нижеволжских водохранилищах. Пределы колебания концентрации этого соединения в исследуемый период составили 0,12–0,95 мг/дм³ в Саратовском водохранилище и 0,16–0,94 мг/дм³ в Волгоградском. Межгодовая динамика нитратного азота характеризовалась снижением среднесезонной концентрации в первое десятилетие XXI в. и тенденцией к увеличению в последующие годы. Парный корреляционный анализ между содержанием нитратов и индексом САК не выявил связи между этими показателями, но при полиномиальном сглаживании установлена значимая связь, характеризуемая коэффициентами корреляции $r = 0,65$ при $p = 0,01$ для Саратовского водохранилища и $r = 0,55$ при $p = 0,02$ для Волгоградского (рис. 5).

Содержание минерального фосфора колебалось в 2001–2022 гг. в пределах 0,024–0,084 мг/дм³. В отличие от соединений минерального азота, средние концентрации фосфатов в рассматриваемые периоды были близки (табл. 3). В 2001–2010 гг. при отрицательном тренде водного стока изменения содержания элемента происходили в противофазе с этим показателем: в годы повышенной водности количество фосфора снижалось, а при уменьшении стока содержание этого элемента возрастало. Особенностью сезонной динамики минерального фосфора является повышение его содержания осенью [32], очевидно, за счет внутренней биогенной нагрузки – гидролого-гидрофизических и химико-биологических внутриводоемных процессов, тесно связанных с формированием зон аноксии в придонных слоях водохранилища. В предыдущие годы исследования отмечалась аналогичная динамика фосфатов, что позволило сделать

предположение о преимуществе внутриводоемных процессов (регенерации соединений фосфора из донных отложений, минерализации автохтонного ОВ) в генезисе этого элемента. В период уменьшения индекса САК (2001–2010 гг.), характеризующегося снижением количества осадков и, соответственно, объема водного стока, наблюдалась отрицательная тенденция содержания фосфатов. В период повышения индекса САК (2011–2020 гг.) содержание минерального фосфора увеличивалось (рис. 6). Парный корреляционный анализ не выявил связи между этими показателями, но при полиномиальном сглаживании динамики фосфатов в Саратовском и Волгоградском водохранилищах и индекса САК можно отметить согласованное изменение их трендов, выраженное коэффициентами корреляции 0,58 и 0,51 (при $p = 0,00–0,01$) соответственно.

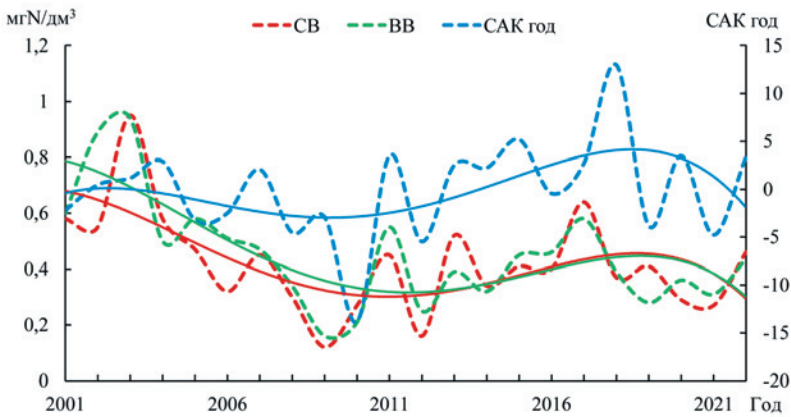


Рис. 5. Динамика индекса САК и содержания азота нитратов в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.

Fig. 5. Dynamics of the NAO index and nitrate content in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022.

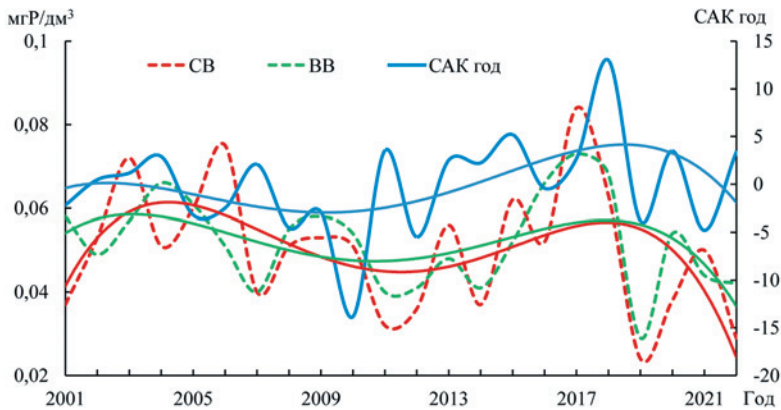


Рис. 6. Динамика индекса САК и содержания фосфатов в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.

Fig. 6. Dynamics of the NAO index and phosphate content in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022.

Взаимодействие САК с водными экосистемами достаточно сложно и не всегда однозначно. Считается, что при отрицательных значениях САК наблюдается похолодание [20], однако в 2010 г. при максимальных годовых отрицательных значениях индекса САК (-13) на водохранилищах Волжского каскада в летний период наблюдалась аномальная жара и максимальное повышение летней температуры воды, вследствие чего в последующие годы зафиксирован рост фитопланктона [19].

В табл. 4 приведены коэффициенты корреляции между зимними и годовыми значениями САК и гидрохимическими показателями. Достоверная связь между индексом САК, июльской температурой воды и водным стоком отмечена в период его снижения. При этом более тесная корреляционная связь зафиксирована с годовыми значениями САК. В положительную фазу индекса САК в 2011–2022 гг. связь между этими показателями не установлена.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между значениями некоторых гидрохимических показателей Саратовского и Волгоградского водохранилищ и гидрометеорологическими характеристиками в разные периоды

Table 4. Correlation coefficients between the values of some hydrochemical indicators of the Saratov and Volgograd reservoirs and hydrometeorological characteristics in different periods of the study

Показатель	Саратовское водохранилище				Волгоградское водохранилище			
	Т воды в июле	Водный сток	САК зима	САК год	Т воды в июле	Водный сток	САК зима	САК год
2001–2010 гг.								
Водный сток	-0,5		0,50	0,63	-0,49		0,50	0,63
Т воды в июле		-0,5	-0,88	-0,84		-0,49	-0,74	-0,84
ПО	-0,86	0,75	0,67	0,85	-0,87	0,07	0,56	0,68
ХПК	-0,16	0,01	0,30	0,18	-0,37	0,16	0,21	0,23
БПК ₅	-0,29	0,25	0,17	0,29	-0,17	0,22	-0,13	0,05
N-NH ₄	-0,83	0,26	0,43	0,53	-0,46	0,43	0,46	0,56
N-NO ₃	-0,40	0,41	0,3	0,51	-0,66	0,40	0,36	0,56
P-PO ₄	-0,16	-0,34	-0,04	0,04	-0,11	0,01	-0,04	0,03
2011–2022 гг.								
Водный сток	-0,45		0,09	0,15	-0,15		0,09	0,08
Т воды в июле		-0,45	-0,36	-0,24		-0,14	-0,32	-0,04
Цветность	-0,17	0,83	0,15	-0,16	-0,10	0,8	-0,46	0,02
ПО	0,24	0,66	-0,16	0,06	-0,28	0,50	-0,35	0,12
ХПК	0,24	-0,03	-0,02	-0,17	0,23	-0,17	-0,48	-0,35
БПК ₅	-0,02	0,45	0,25	0,18	0,49	0,43	-0,25	0,28
N-NH ₄	0,64	0,31	-0,58	-0,36	0,11	0,23	-0,11	-0,47
N-NO ₃	-0,53	0,16	-0,35	0,27	-0,14	0,09	-0,27	0,4
P-PO ₄	-0,62	0,42	0,19	0,50	-0,14	0,68	0,16	0,55

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции (при $p < 0,05$).

Несмотря на то что при парном корреляционном анализе связь между содержанием нитратного азота и фосфатов с индексом САК не установлена, при полиномиальном трендовом сглаживании их динамики коэффициенты корреляции возрастают и становятся значимыми при $r = 0,00-0,02$ (табл. 5), что может свидетельствовать о влиянии глобальных климатических факторов на динамику этих ингредиентов.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между значением индекса САК и объемом годового стока, среднесезонной концентрацией нитратов и фосфатов в 2001–2022 гг.
Table 5. Correlation coefficients between the value of the NAO index and the volume of annual runoff, the average seasonal concentration of nitrates and phosphates in 2001–2022

Показатель	Водохранилище			
	Саратовское		Волгоградское	
	r фактическое	r расчетное	r фактическое	r расчетное
Водный сток	0,12	0,80	0,16	0,72
N-NO ₃	0,02	0,65	0,11	0,55
P-PO ₄	0,09	0,58	0,01	0,51

За исследуемый период не выявлено закономерностей в динамике нитритного азота и кремния. Содержание нитритов в основном было низким (0,006–0,025 мгN/дм³), но в отдельные годы (2011–2014 гг.) на некоторых станциях, главным образом Саратовского водохранилища, зарегистрировано существенное повышение количества этого соединения, что может быть связано с поступлением загрязняющих веществ и торможением процесса нитрификации. Содержание кремния не связано с климатическими изменениями и определяется, главным образом, географической зональностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большая часть акватории водохранилищ Нижней Волги находится в пределах одной географической зоны, что определяет сходство природно-климатических условий. В результате низкой боковой приточности исследуемых водоемов их гидрохимический режим определяется притоком ингредиентов с водным стоком из вышерасположенных водохранилищ каскада и собственными внутриводоемными процессами.

Колебания содержания общего и лабильного органического вещества в Волгоградском водохранилище выражены более отчетливо, чем в Саратовском. В связи с устойчивой тенденцией повышения летней температуры воды в условиях продолжающейся климатической трансформации допустимо прогнозировать дальнейший рост первичной продукции в водохранилищах и увеличение содержания легкоокисляемого автохтонного органического вещества.

Цветность воды исследованных искусственных водоемов характеризуется близкими значениями, их средневегетационные концентрации статистически связаны с объемом стока. Уровень содержания органического вещества, окисляемого перманганатом калия, в Саратовском водохранилище тесно связан

с межгодовой водностью, в отличие от Волгоградского, где отмечена слабая корреляция между этими показателями, вероятно, в связи с более высокой трофностью водоема и вкладом в объем содержания этой группы веществ автохтонного ОВ. В связи с продолжающимися климатическими изменениями и снижением объема стока в половодье можно ожидать дальнейшего уменьшения связанных с ним показателей, характеризующих аллохтонное органическое вещество: цветности и перманганатной окисляемости.

Тенденции изменения содержания биогенных элементов за последние двадцать два года позволили выявить определяющий фактор, влияющий на их среднесезонную концентрацию и прогнозировать дальнейшую динамику в связи с климатической трансформацией. Пределы колебания содержания биогенных элементов и их межгодовая динамика в Саратовском и Волгоградском водохранилищах очень близки по значениям, что указывает на доминирование в их генезисе водного стока из вышерасположенных водохранилищ каскада. Снижение водного стока в половодье, очевидно, является одной из основных причин уменьшения среднесезонной концентрации аммонийного азота. Увеличение количества оттепелей и жидких осадков в зимний период приводит к возрастанию объема вод, богатых гумусовым веществом с большим содержанием природного железа. Как следствие, в исследуемых водохранилищах отмечен достоверный положительный тренд этого элемента. Динамика нитратов и фосфатов связана с колебаниями индекса САК, являющегося маркером глобальных атмосферных процессов. Закономерности и механизмы этого влияния требуют дальнейшего изучения.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам Саратовского филиала ФГБНУ «ВНИРО» И.Г. Филимоновой, Л.В. Гришиной и Е.Г. Кузиной за активное участие в обработке гидрохимического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черенкова Е.А., Сидорова М.В. Оценка современных условий недостаточного увлажнения, влияющих на маловодность в бассейнах крупных рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 260–269. DOI:10.31857/S0321059621030068.
2. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: научно-прикладной справочник. СПб.: ООО «РИАЛ». 2021. 190 с.
3. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научные технологии, 2022. 124 с.
4. Законнова А.В., Литвинов А.С. Многолетние изменения гидроклиматического режима Рыбинского водохранилища // Труды ИБВВ РАН. 2016. № 75(78). С. 16–22. DOI: 10.24411/0320-3557-2016-10016.
5. Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Далечина И.Н. Эвтрофирование Волгоградского водохранилища: влияние климатической трансформации или сукцессионных процессов? // Труды Зоологического института РАН. 2023. Т. 327. № 3. С. 390–406. DOI:10.31610/trudyzin/2023.327.3.390.
6. Шашуловская Е.А., Мосияш С.А. Особенности динамики экологических параметров Саратовского водохранилища в начале XXI века // Трансформация экосистем. 2023. № 6(5). С. 11–28. DOI: 10.23859/estr-220701.

7. Перова С.Н. Изменения структуры макрозообентоса Рыбинского водохранилища в условиях повышения температуры // Биология внутренних вод. 2019. № 4–2. С. 44–54. DOI: 10.1134/S0320965219040296.
8. Linnik P.M. Climate Change as an Important Factor of the Formation of the Chemical Composition of Surface Waters at the Present Time (a Review) // Hydrobiological Journal 2021. Vol. 57. No. 1. P. 78–94 DOI: 10.1615/HydrobJ.v57.i1.90.
9. Ottersen G., Planque B., Belgrano A., Post E., Reid Ph.C. Stenseth N.C. Ecological effects of the North Atlantic Oscillation // Oecologia. 2001. 128. P. 1–14. DOI:10.1007/s004420100655.
10. Markovic D., Scharfenberger U., Schmutz S., Voltaire C. Variability and alterations of water temperatures across the Elbe and Danube River Basins // Climatic Change. 2013. Vol. 119. P. 375–389. DOI: 10.1007/s10584-013-0725-4.
11. Kukushkin A.S. Effects of large-scale atmospheric oscillations on hydrometeorological conditions in the Danube River Basin in winter // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. Vol. 45. P. 630–638. DOI: 10.3103/S1068373920090046.
12. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. №3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
13. Волга и ее жизнь. Л.: «Наука». 1978. 348 с.
14. Горин Ю.И. Некоторые черты гидрологического режима Саратовского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод АН СССР. 1972. Вып. 23 (26). С. 193–198.
15. Шашуловский В.А., Мосияш С.С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: КМК. 2010. 250 с.
16. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
17. Лазарева В.И., Копылов А.И., Пырина И.Л., Соколова Е.А., Масленникова Т.С. Отклик планктона Рыбинского водохранилища на динамику Североатлантического колебания (North atlantic oscillation – NAO) // Проблемы водохранилищ и их водосборов: труды Межд. научно-практ. конф. Пермь, 2013. С. 145–150.
18. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Североатлантическое колебание и увлажнение Европейской территории России // Общество. Среда. Развитие. 2014. Т. 31. № 2. С. 191–198.
19. Минеева Н.М. Содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах Верхней Волги (2005–2016 гг.) // Биология внутренних вод. 2019. №2–1. С. 33–41. DOI: 10.1134/S0320965219020104.
20. Копылов А.И., Масленникова Т.С., Косолапов Д.Б. Сезонные и межгодовые колебания первичной продукции фитопланктона в Рыбинском водохранилище: влияние погодных и климатических изменений // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 3. С. 270–277. DOI: 10.31857/S0321-0596463270-277.
21. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А. Изменение зимнего стока рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 15. № 6. С. 581–588. DOI: 10.7868/S0321059615060036.
22. Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Повышение температуры Куйбышевского водохранилища и риски водопользования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 49–62. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_4.
23. Минеева Н.М., Бикбулатова Е.М. Вклад первичной продукции в общий фонд органического вещества в водохранилищах Волжского каскада // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 5. С. 587–594.
24. Лозовик П.А., Зобкова М.В., Рыжаков А.В., Зобков М.Б., Ефремова Т.А., Сабылина А.В., Ефремова Т.В. Alloхтонное и автохтонное органическое вещество природных вод: кинетические и термодинамические закономерности трансформации, количественный и качественный составы // Доклады академии наук. 2017. Т. 477. № 6. С. 728–732. DOI: 10.7868/S086956521736021X.

25. Шашуловская Е.А., Мосияш С.А. Гидрохимический режим Волгоградского водохранилища в подледный (зимний) период / Сб. статей междунаучно-практ. конф. «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» / Севастополь: СевГУ, 2019. С. 1768–1772.
26. Минеева Н.М., Поддубный С.А., Степанова И.Э., Цветков А.И. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона Нижней Волги // Биология внутренних вод. 2023. №1. С. 53–64. DOI: 10.31857/S0320965223010114.
27. Кирпичникова Н.В., Лапина Е.Е., Кудряшова В.В. Многолетняя динамика содержания азота и фосфора в грунтовых водах водосбора Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 536–545. DOI: 10.31857/S0321059620050107.
28. Жежеря В.А., Жежеря Т.П., Линник П.М. Біогенні речовини у воді водосховищ Дніпровського каскаду після зарегулювання стоку Дніпр. // Гідробіологічний журнал. 2021. № 6. С. 89–109.
29. Veraart A. J., De Klein J. J. and Scheffer M. Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics // PLoS One. 2011. 6(3). P. e18508.
30. Chou Q., Nielsen A., Andersen T.K., Hu F., Chen W., Cao T., Ni L., Søndergaard M., Johansson L.S., Jeppesen E. and Trolle D. The impacts of extreme climate on summer-stratified temperate lakes: Lake Søholm, Denmark, as an example // Hydrobiologia. 2021. Vol. 848. P. 3521–3537. DOI:10.1007/s10750-021-04607-9.
31. Isles P.D.F., Jonsson A., Creed I.F., Bergstrom A.-K. 2020. Does browning affect the identity of limiting nutrients in lakes? // Aquatic Science. 2020. 82(2). Art. 45. DOI:10.1007/s00027-020-00718-y.
32. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. and Dalechina I. N. Long-Term Changes in the Main Indicators of the Trophic State of the Large Plain Reservoir under the Influence of Climatic Transformation and Successional Processes // Inland Water Biology. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 627–637. DOI: 10.1134/S1995082921060110.
33. Калинин Н.М., Филатов Н.Н., Теканова Е.В., Балаганский А.Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // Региональная экология. 2018. № 2. С. 65–73. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73.

REFERENCES

1. Cherenkova E.A., Sidorova M.V. On the impact of insufficient atmospheric moistening of the low annual discharge of large rivers in European Russia. *Water resources*. 2021. Vol. 48. No. 3. P. 351–360. DOI: 10.1134/S0097807821030064.
2. Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of river flow in the Russian Federation: scientific and applied reference. St. Petersburg: REAL LLC. 2021. 190 p. (In Russ.).
3. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022. 124 p. (In Russ.).
4. Zakonnova A.V., Litvinov A.S. Long-term changes in the hydrochemical regime of the Rybinsk reservoir. *Proceedings of the IBIW RAS*. 2016. No.75(78). P. 16–22. DOI: 10.24411/0320-3557-2016-10016 (In Russ.).
5. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Dalechina I.N. Eutrophication of the Volgograd reservoir: the influence of climatic transformation or successional processes? *Proceedings of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences*. 2023. Vol. 327. No.3. P. 390–406. DOI: 10.31610/trudyzin/2023.327.3.390 (In Russ.).
6. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A. Characteristic features of the dynamics of environmental parameters of the Saratov Reservoir in the beginning of the 21st century. *Ecosystem Transformation*. 2023. 6 (5). 11–28. DOI: 10.23859/estr-220701.
7. Perova S.N. Changes in the structure of macrozoobenthos in the Rybinsk reservoir under conditions of rising temperature. *Inland Water Biology*. 12(S). P. 49–59. DOI: 10.1134/S0320965219040296.

8. Linnik P.M. Climate Change as an Important Factor of the Formation of the Chemical Composition of Surface Waters at the Present Time (a Review). *Hydrobiological Journal*. 2021. 57(1). P. 78–94 DOI: 10.1615/HydrobJ.v57.i1.90.
9. Ottersen G., Planque B., Belgrano A., Post E., Reid Ph.C. Stenseth N.C. Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia*. 2001. Vol. 128. 1–14 DOI:10.1007/s004420100655.
10. Markovic D., Scharfenberger U., Schmutz S., Voltaire C. Variability and alterations of water temperatures across the Elbe and Danube River Basins. *Climatic Change*. 2013. Vol. 119. P. 375–389. DOI: 10.1007/s10584-013-0725-4.
11. Kukushkin A.S. Effects of large-scale atmospheric oscillations on hydrometeorological conditions in the Danube River Basin in winter. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. Vol.45. P. 630–638. DOI: 10.3103/S1068373920090046.
12. Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stream flow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water resources*. 2022. Vol. 49. No. 3. P. 333–350. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
13. Volga and its life. L., “Science”. 1978. 348 p. (In Russ.).
14. Gorin Yu.I. Some features of the hydrological regime of the Saratov reservoir. *Tr. Institute of Biology. inter. waters of the USSR Academy of Sciences*. 1972. Iss. 23 (26). P. 193–198 (In Russ.).
15. Shashulovskiy V.A., Mosiyash S.S. Formation of biological resources of the Volgograd reservoir during the succession of its ecosystem. Moscow, KMK. 2010. 250 p. (In Russ.).
16. Guidelines for the chemical analysis of land surface waters. L.: Hydrometeoizdat, 1977. 541 p. (In Russ.).
17. Lazareva V.I., Kopylov A.I., Pyrina I.L., Sokolova E.A., Maslennikova T.S. Response of the plankton of the Rybinsk reservoir to the dynamics of the North Atlantic oscillation (North Atlantic oscillation - NAO). *Problems of reservoirs and their catchments: proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Perm. 2013. Pp. 145–150 (In Russ.).
18. Malinin V.N., Gordeeva S.M. North Atlantic oscillation and humidification of the European territory of Russia. *Society, Environment, Development*. 2014. Vol. 31. No.2. Pp. 191–198 (In Russ.).
19. Mineeva N.M. Content of photosynthetic pigments in the Upper Volga reservoirs (2005–2016). *Inland Water Biology*. 2019. No. 1–2. P. 161–169. DOI: 10.1134/S0320965219020104.
20. Kopylov A.I., Maslennikova T.S., Kosolapov D.B. Seasonal and year-to-year variations of phytoplankton primary production in the Rybinsk reservoir: the effect of weather and climatic variations. *Water Resources*. 2019. Vol. 46. No. 3. P. 395–402. DOI: 10.31857/S0321-0596463270-277.
21. Dzhamalov R.G., Telegina E.A., Frolova N.L. Winter runoff variations in European Russia. *Water Resources*. 2015. Vol. 15. No. 6. P. 758–765. DOI: 10.7868/S0321059615060036.
22. Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Temperature rise of the Kuibyshev reservoir and risks of water use. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 49–62. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_4 (In Russ.).
23. Mineeva N.M., Bikbulatova E.M. The contribution of primary production to the overall organic matter pool in Volga reservoirs. *Water Resources*. 2008. Vol. 35. No. 5. P. 562–569.
24. Lozovik P.A., Zobkova M.V., Ryzhakov A.V., Zobkov M.B., Efremova T.A., Sabylina A.V., Efremova T.V. Allochthonous and autochthonous organic matter of natural waters: kinetic and thermodynamic patterns of transformation, quantitative and qualitative compositions. *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 477. No. 2. P. 1510–1514. DOI: 10.7868/S086956521736021X.
25. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A. Hydrochemical regime of the Volgograd reservoir in the ice (winter) period. *Collection of articles of the international scientific and practical conference “Environmental, industrial and energy security -2019”*. Sevastopol: SevGU. 2019. P. 1768–1772 (In Russ.).
26. Mineeva N.M., Poddubnyy S.A., Stepanova I.E., Tsvetkov A.I. Abiotic factors and their role in the development of phytoplankton in the Lower Volga. *Inland Water Biology*. 2023. Vol. 16. No. 1. P. 70–80. DOI: 10.31857/S0320965223010114.
27. Kirpichnikova N.V., Lapina E.E., Kudryashova V.V. Long-term dynamics of nitrogen and phosphorus concentrations in subsoll water in Ivankovo reservoir. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. No. 5. P. 721–730. DOI: 10.31857/S0321059620050107.

28. Zhezherya V. A., Zhezherya T. P., Linnik P. M. Biogenic substances in the water of reservoirs of the Dnieper cascade after overregulation of the Dnieper runoff. *Hydrobiological Journal*. 2021. No. 6. P. 89–109 (In Ukr.).
29. Veraart A.J., De Klein J.J. and Scheffer M. Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics. *PLoS One*. 2011. 6(3). P. e18508.
30. Chou Q., Nielsen A., Andersen T.K., Hu F., Chen W., Cao T., Ni L., Søndergaard M., Johansson L.S., Jeppesen E. and Trolle D. The impacts of extreme climate on summer-stratified temperate lakes: Lake Søholm, Denmark, as an example. *Hydrobiologia*. 2021. Vol. 848. P. 3521–3537. DOI:10.1007/s10750-021-04607-9.
31. Isles P.D.F., Jonsson A., Creed I.F., Bergstrom A.-K. Does browning affect the identity of limiting nutrients in lakes? *Aquatic Sciences*. 2020. 82(2). Art. 45. DOI:10.1007/s00027-020-00718-y.
32. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. and Dalechina I. N. Long-Term Changes in the Main Indicators of the Trophic State of the Large Plain Reservoir under the Influence of Climatic Transformation and Successional Processes. *Inland Water Biology*. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 627–637. DOI: 10.1134/S1995082921060110.
33. Kalinkina N.M., Filatov N.N., Tekanova E.V., Balagansky A.F. Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Lake Onega with the Shuya River waters under conditions of climatic changes. *Regional ecology*. 2018. No. 2. P. 65–73. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73 (In Russ.).

Сведения об авторах:

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

Мосияш Светлана Александровна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, лаборатория рыбохозяйственной экологии Саратовского филиала ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; ORCID0000-0003-0875-6358; e-mail: mosiyashsa@yandex.ru

About the authors:

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

Svetlana A. Mosiyash, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Fisheries Ecology of the Saratov Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography, 152 Chernyshevsky str., Saratov, 410002, Russia; ORCID0000-0003-0875-6358; e-mail: mosiyashsa@yandex.ru

Современные особенности ледового режима Нижнего Енисея

В.В. Зуев¹  , В.А. Уйманова^{1,2} , А.В. Павлинский¹ 

 vzuev@list.ru

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В условиях современных изменений климата повышается актуальность системных исследований ледового режима рек. Особенности ледового режима рек – значимая составляющая рационального использования транспортной инфраструктуры и, как следствие, социально-экономического развития территорий. В статье представлен анализ ледового режима Нижнего Енисея (протяженностью от впадения р. Ангары до устья) за период с 2005 по 2021 гг. **Методы.** Проведен анализ особенностей формирования ледяного покрова, образования заторов, максимальных толщин льда в рассматриваемых створах, особое внимание уделено процессу вскрытия Енисея, нередко сопровождающегося продолжительным торшением и навалами льда. **Результаты.** Пространственно-временной анализ характеристик ледового режима Нижнего Енисея показал, что на всем исследуемом участке наблюдается рост числа случаев с навалами и торосами льда, а толщина льда и продолжительность его присутствия на реке имеет тренд на уменьшение. На большей части исследуемых постов даты замерзания смещаются на более поздние, даты вскрытия практически не изменяются.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледовый режим, ледостав, фаза замерзания, фаза вскрытия, заторы, толщина льда, торосы, р. Енисей.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

Для цитирования: Зуев В.В., Уйманова В.А., Павлинский А.В. Современные особенности ледового режима Нижнего Енисея // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 101–113. DOI:10.35567/19994508-2024-3-101-113.

Дата поступления 21.02.2024.

MODERN CHARACTERISTICS OF THE ICE REGIME OF THE LOWER YENISEI

Vladimir V. Zuev¹  , Valeria A. Uymanova^{1,2} , Aleksey V. Pavlinsky¹ 

 vzuev@list.ru

¹Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

ABSTRACT:

Relevance. In the current conditions of climate change, the relevance of the rivers' ice regime studies is growing. Special features of rivers' ice regime are a significant component of the transport infrastructure use and, as a consequence, social/economic development of territories. The article presents the analysis of the Lower Yenisei (from the Angara inflow to the mouth) ice regime over the 2005 - 2021 period. **Methods.** Special attention was paid to the breakup process,

© Зуев В.В., Уйманова В.А., Павлинский А.В., 2024

often accompanied by long-lasting ice reefing and pileup. **Results.** A spatial and temporal study of the Lower Yenisei ice regime revealed the increase in the number of reefing and pileup cases and the thickness of the ice throughout the entire studied area, while the duration of the presence of ice on the river has a decreasing trend. At most of the gauging stations the freeze-up dates are shifted to later ones, and the break-up dates remain unchanged.

Keywords: ice regime, freeze-up, freezing phase, opening phase, ice jams, ice thickness, ice piles, reefing, Yenisei

Financing: This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121031300156-5).

For citation: Zuev V.V., Uymanova V.A., Pavlinskiy A.V. Modern characteristics of the ice regime of the Lower Yenisei. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies. Management.* 2024. No. 3. P. 101–113. DOI:10.35567/19994508-2024-3-101-113.

Received 21.02.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение характера ледовых явлений на реках становится все более актуальным в связи с современными изменениями климата [1–6]. Бассейн р. Енисей является одним из крупнейших бассейнов России, к тому же часть Нижнего Енисея относится к территории Российской Арктики, которая более уязвима к процессам климатических изменений. Особенности ледового режима рек – значимая составляющая рационального использования транспортной инфраструктуры и, как следствие, социально-экономического развития территорий. Толщина ледяного покрова является определяющим фактором при оценке сроков действия ледовых речных переправ и зимников. Сроки появления и разрушения ледяного покрова, продолжительность ледостава – важные показатели для навигации, гидротехнического строительства, организации переправ и т. д.

Частью Нижнего Енисея принято считать территорию от впадения р. Ангара до устья протяженностью около 2000 км. Нижний Енисей представляет собой широкий мощный поток со значительными глубинами. Основным источником питания Енисея служат талые снеговые и дождевые воды, грунтовые воды в питании реки имеют второстепенное значение. В связи с этим водный режим Енисея характеризуется высоким и продолжительным весенне-летним половодьем, устойчивой осенней и низкой зимней меженью [7].

За многолетний период исследования ледового режима бассейна Енисея накоплен, обобщен и проанализирован большой фактический материал, касающийся в основном Верхнего Енисея [8] с прилегающей к нему Красноярской ГЭС [9]. В настоящее время существует необходимость в изучении особенностей ледового режима Нижнего Енисея, т. к. результаты предыдущих исследований [10, 11] уже устарели или имеют обобщенный характер [12]. Обновлять их чрезвычайно важно, ведь в последние десятилетия под воздействием климатических изменений¹ в большинстве регионов России на реках отмечается статистически значимое смягчение ледового режима [13]. Также во многих

¹ Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Изд-во ФГБУ ИГКЭ Росгидромета и РАН, М., 2015. 1008 с.

случаях ледовыми явлениями обусловлены опасные гидрологические процессы, в т. ч. наводнения. К опасным ледовым явлениям на территории России относятся: образование внутриводного льда и шуги, зажоры, раннее появление льда и установление ледостава при низком уровне воды; наледи, промерзание; низкая толщина и прочность льда в период ледостава; густой ледоход при высоком уровне воды; заторы, навалы льда; позднее вскрытие и очищение при низком уровне воды [14, 15].

Целью данного исследования является пространственно-временной анализ характеристик ледового режима Нижнего Енисея. На основе данных 15 гидрологических постов, расположенных на р. Енисей, произведена оценка изменчивости ледового режима реки за последние 15 лет (2005–2021 гг.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного материала использовали данные наблюдений за температурой воздуха, ледовым, уровенным режимом и толщиной льда Нижнего Енисея, проводимые Росгидрометом^{2,3}. Проанализированы соответствующие источники – справочные и научные. В табл. 1 представлена информация по исследуемым гидрологическим постам (г/п). На рис. 1 схематично показано расположение гидрологических постов и метеорологических станций, данные с которых были использованы для исследований. Все посты, кроме пгт Стрелка, относятся к району Крайнего Севера.

Дата начала ледовых явлений определяется появлением их первых признаков (забереги, шуга и т. д.), дата окончания – полным очищением реки ото льда. Краткосрочные случаи ледовых явлений до или после перерыва более 10 сут не учитывались. На постах, где изменение ледовых условий происходило в результате применения технических средств (рубка льда для навигации), данные учитывали как ледостав.

Таблица 1. Исследуемые гидрологические посты на Нижнем Енисее

Table 1. Studied gauging stations on the Lower Yenisei

№	Наименование поста на р. Енисей	Код поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста		Начало действия число, месяц, год
					высота, м	система высот	
1	пгт Стрелка	9074	2137	356 000	74.43	БС	01.08.1972
2	г. Енисейск	9079	2054	1 400 000	64.78	БС	28.06.1902
3	с. Назимово	9082	1876	1 440 000	52.49	БС	10.10.1933
4	с. Ярцево	9085	1774	1 460 000	41.63	БС	15.10.1936
5	с. Ворогово	9087	1660	1 510 000	33.4	БС	07.06.1912
6	д. Подкаменная Тунгуска	9092	1568	1 760 000	19.84	БС	01.11.1935

² Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). Режим доступа: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation> (дата обращения 01.11.2023).

³ Список постов гидрологических наблюдений на реках, ручьях, каналах по УГМС // АИС ГМВО. Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=139> (дата обращения: 1.11.2023).

Таблица 1. Продолжение.

№	Наименование поста на р. Енисей	Код поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ³	Отметка нуля поста		Начало действия число, месяц, год
					высота, м	система высот	
7	д. Бахта	9094	1427	1 770 000	17.29	БС	10.06.1947
8	с. Верхнеимбатск	9095	1323	1 810 000	12.56	БС	03.07.1912
9	с. Верещагино	9096	1171	1 850 000	6.02	БС	01.01.1948
10	с. Селиваниха	9801	974	2 340 000	1.27	БС 77	04.07.1912
11	с. Курейка	9802	864	2 380 000	-0.85	БС	01.05.1947
12	г. Игарка	9803	697	2 440 000	0.03	БС	03.02.1936
13	с. Потапово	9804	538	2 480 000	-1.93	БС	23.09.1949
14	г. Дудинка	9805	433	2 480 000	-2.71	БС	08.07.1912
15	с. Караул	9807	253	2 540 000	-1.66	БС	11.10.1953

Таблица 2. Средние даты начала и окончания ледовых явлений и ледостава, их продолжительность

Table 2. Average dates of the beginning and the end of ice phenomena and river freeze-up and their duration

Наименование поста на р. Енисей	Средняя дата начала		Средняя дата окончания		Средняя продолжительность, дней			
	ледовых явлений	ледостава	ледостава	ледовых явлений	фазы заморозания	ледостава	фазы вскрытия	общее количество
пгт Стрелка	22 ноября	3 января	12 апреля	4 мая	42	86	37	165
г. Енисейск	29 октября	25 декабря	8 апреля	13 мая	57	105	36	198
с. Назимово	29 октября	8 декабря	24 апреля	17 мая	39	136	23	199
с. Ярцево	27 октября	6 декабря	27 апреля	28 мая	39	144	30	214
с. Ворогово	23 октября	6 декабря	30 апреля	18 июня	42	146	49	237
д. Подкаменная Тунгуска	20 октября	29 ноября	26 апреля	25 мая	40	149	29	218
д. Бахта	20 октября	20 ноября	30 апреля	25 мая	31	163	25	218
с. Верхнеимбатск	21 октября	17 ноября	2 мая	26 мая	27	167	24	218
с. Верещагино	20 октября	17 ноября	28 апреля	28 мая	28	163	30	221
с. Селиваниха	20 октября	9 ноября	6 мая	27 мая	21	179	21	221
с. Курейка	21 октября	25 ноября	7 мая	27 мая	35	164	21	219
г. Игарка	21 октября	2 ноября	9 мая	8 июня	12	190	28	230
с. Потапово	18 октября	30 октября	10 мая	10 июня	12	193	31	236
г. Дудинка	24 октября	31 октября	18 мая	11 июня	7	199	26	232
с. Караул	17 октября	25 октября	21 мая	17 июня	12	203	27	244

За каждый гидрологический год на каждом из исследуемых постов были определены даты начала и окончания ледовых явлений, а также даты начала и окончания ледостава (табл. 2). Рассчитана продолжительность в днях фазы замерзания, ледостава и фазы вскрытия. Определены самые ранние и самые поздние даты появления и исчезновения льда на реке, а также средние даты за исследуемый период по каждому посту.

В рамках проведенного исследования установлена максимальная и средняя толщина льда на постах за каждый исследуемый гидрологический год (табл. 3), рассмотрены опасные гидрологические явления: определено число случаев наледей, заторов, торосов и навалов льда (табл. 4).



Рис. 1. Схема расположения гидрологических постов и метеорологических станций на Нижнем Енисее.

Fig 1. Layout of gauging and weather stations on the Lower Yenisei.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Следует отметить, что при анализе возможных причин выявленных изменений, помимо климатических различий, механизм формирования ледового режима определяется также теплообменом водной массы с атмосферой, типом питания реки, водностью и скоростью течения, морфометрическими характеристиками русла, гидравлическими свойствами и т. д. Формирование ледовых явлений зависит от общих природных условий, а различия по годам определяются сезонными особенностями погоды, которые в последние десятилетия подвержены значительным изменениям⁴ [16].

На исследуемом участке наблюдаются ледовые явления различных масштабов и продолжительности: забереги, шугоход, шуга под льдом, снежура, разводья, осенний ледоход, вода на льду, наледи, торосы, навалы льда и т. д. В большинстве случаев они сменяют друг друга, но встречаются и одновременно несколько ледовых явлений в один день. Следует отметить, что ледостав наблюдается на всех исследуемых постах, но в г. Дудинка и с. Караул производится механическая рубка льда в целях обеспечения навигации.

Замерзание. Продолжительность замерзания (от появления ледовых явлений до установления ледостава) на р. Енисей на участке 1884 км от пгт Стрелка до с. Караул колеблется от 58 до 8 дней. Большое количество дней с ледовыми явлениями (57 дней в г. Енисейске) связано с расположением этого поста выше по течению: из-за более теплой погоды увеличивается процесс замерзания, сопровождающийся более продолжительными осенними явлениями – заберегами, шугоходами и осенними ледоходами. На северных постах в г. Дудинка и с. Караул ледовые явления держатся в среднем 8–9 дней, после чего Енисей покрывается сплошным ледоставом.

На участке от пгт Стрелка до с. Селиванихи чаще всего ледоставу предшествуют забереги и шугоход разной интенсивности, встречается сало. От с. Селиваниха эти ледовые явления сменяются практически сразу ледоставом: всего несколько дней идет редкий ледоход со снежурой и менее чем через неделю фиксируется ледостав, что объясняется близостью Арктики.

В среднем ледостав начинается в конце октября – начале декабря (с севера на юг), ледовые явления фиксируются за одну–две недели до ледостава (табл. 2). Самая ранняя дата начала ледовых явлений – 7 октября 2010 г. в с. Потапово, самая поздняя – 23 декабря 2013 г. в пгт Стрелка.

Ледяной покров. Нарастание льда в течение всей зимы зависит от гидрометеорологических условий – температуры воздуха, количества осадков, толщины снежного покрова на льду, его плотности и др. [17]. Нарастание льда на исследуемом участке происходит в течение всей зимы до момента вскрытия реки. Средняя толщина льда за 2005–2021 гг. – 63 см, изменялась с 19 см (пгт Стрелка в 2020–2021 гг.) до 112 см (г. Дудинка в 2010–2011 гг.) (табл. 3). От пгт Стрелка выше по течению до с. Караул толщина льда увеличивалась, что объясняется, в первую очередь, температурным режимом. Однако за исследуемый временной интервал толщина льда имеет тренд на уменьшение на большей части исследуемых постов.

⁴ Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. А.П. Муранова. 1973. 723 с.

Например, максимальная толщина льда в с. Караул в 2010 г. была зафиксирована на 171 см, в 2021 г. – 95 см. Незначительный рост толщины льда наблюдается в д. Подкаменная Тунгуска, г. Игарка и с. Потапово (тренд около 5 см).

Наледи для исследуемого участка явление редкое, наблюдались на одном посту в д. Бахта в 2008 году (30 дней в январе).

Таблица 3. Максимальная и средняя толщина льда на Нижнем Енисее
Table 3. Maximum and average ice thickness on the Lower Yenisei

Наименование поста на р. Енисей	Толщина льда, см		Дата
	максимальная	средняя	
пгт Стрелка	70	38	20 февраля –10 марта 2017 г.
г. Енисейск	83	51	31 марта 2009 г.
с. Назимово	113	56	20 апреля 2014 г.
с. Ярцево	115	57	20 декабря 2009 г.
с. Ворогово	119	67	28 февраля 2013 г.
д. Подкаменная Тунгуска	104	56	31 марта 2018 г.
д. Бахта	100	64	31 марта 2012 г.
с. Верхнеимбатск	99	54	31 марта – 10 апреля 2012 г.
с. Верещагино	120	62	10-20 марта 2011 г.
с. Селиваниха	127	65	20 марта 2011
с. Курейка	101	64	март-апрель 2011 г., 2014 г.
г. Игарка	132	65	30 апреля 2014 г.
с. Потапово	150	83	15 мая 2011 г.
г. Дудинка	176	86	15 мая 2011 г.
с. Караул	172	77	25 мая 2011 г.

Вскрытие. Даты вскрытия реки от ледостава и очищения от ледовых явлений представлены в табл. 2. Ледовые явления после вскрытия реки длятся в среднем три недели. Самая ранняя дата вскрытия реки – 4 марта 2020 г. (пгт Стрелка), в с. Караул – 4 мая 2011 г. Самое позднее вскрытие реки наблюдалось 2 июня 2021 г. в г. Дудинка. Разрушение ледостава происходит в середине мая-начале июня (табл. 2).

Заторы проявляются не каждый год, наиболее часто они фиксируются в г. Игарка (табл. 4): за 15 лет затор был в 2005, 2006, 2007, 2016, 2020 и 2021 годах. Самый продолжительный длился 16 дней в 2006 г. в д. Подкаменная Тунгуска в период замерзания Нижнего Енисея (20 ноября–5 декабря). Вследствие продолжительного густого шугохода (32 дня) образовался затор ниже поста с повышением уровня воды до 1081 см, при среднем уровне в это время – 650 см.

Ледоход в среднем на пгт Стрелка длится 1–1,5 месяца (редкий ледоход), севернее продолжительность ледохода меньше – около недели в с. Караул. Ледоход практически на всем исследуемом участке сопровождается навалами льда.

Навалы и торосы льда. Окончание ледостава по всему исследуемому участку в большей части случаев сопровождается навалами и торосами льда (табл. 4). Лед и высокие уровни воды могут приводить к повреждению гидротехнических сооружений (откосов плотин, дамб, опор мостов, ледосбросных сооружений) и судов не только в период образования заторов и зажоров, но и во время ледохода при образовании навалов льда [14].

Таблица 4. Число случаев опасных явлений на Нижнем Енисее
 Table 4. Number of adverse phenomena cases on the Lower Yenisei

Наименование поста	Число случаев (дни)		
	навалы и торосы льда	заторы	наледи
р. Енисей – пгт Стрелка	191	1	–
р. Енисей – г. Енисейск	153	–	–
р. Енисей – с. Назимово	222	3	–
р. Енисей – с. Ярцево	316	–	–
р. Енисей – с. Ворогово	664	8	–
р. Енисей – д. Подкаменная Тунгуска	168	16	–
р. Енисей – д. Бахта	232	4	30
р. Енисей – с. Верхнеимбатск	242	4	–
р. Енисей – с. Верещагино	189	3	–
р. Енисей – с. Селиваниха	74	11	–
р. Енисей – с. Курейка	10	9	–
р. Енисей – г. Игарка	164	23	–
р. Енисей – с. Потапово	139	13	–
р. Енисей – г. Дудинка	159	1	–
р. Енисей – с. Караул	150	–	–

Из-за изменения ледовых условий с применением технических средств для обеспечения навигации в самых северных районах, в г. Дудинка и с. Караул торосы льда – частое явление на протяжении всей зимы. В г. Дудинка находится одноименный морской порт, который круглый год обеспечивает транспортное сообщение для Норильска, также он является единственным морским портом, который ежегодно затапливается. Негативными последствиями, вызванными навалами льда и затоплением, является повреждение причальных стенок, выдавливание бетонных плит, повреждение подкрановых путей. [18].

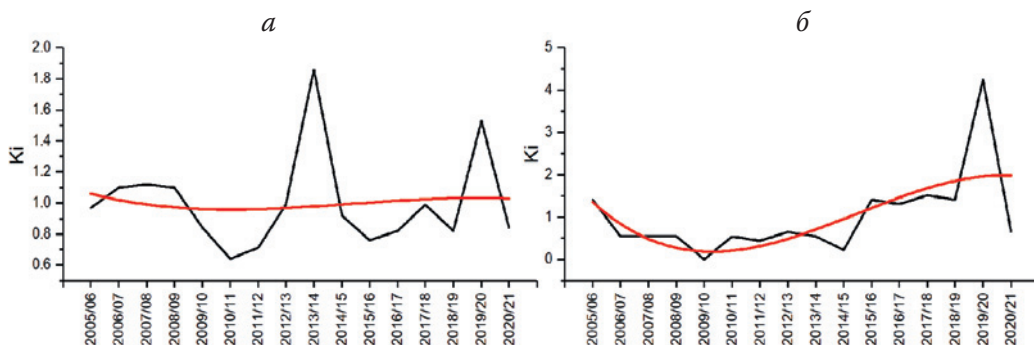


Рис. 2. Графики отклонения модульных коэффициентов от среднего для:
 а – продолжительности фазы замерзания на г/п с. Ярцево;
 б – дат разрушения ледостава на г/п с. Игарка.

Fig 2. Graphs of deviation of modular coefficients from mean for:

a) the duration of the freezing phase at station Yartsevo; b) dates of ice break-up at the station Igarka.

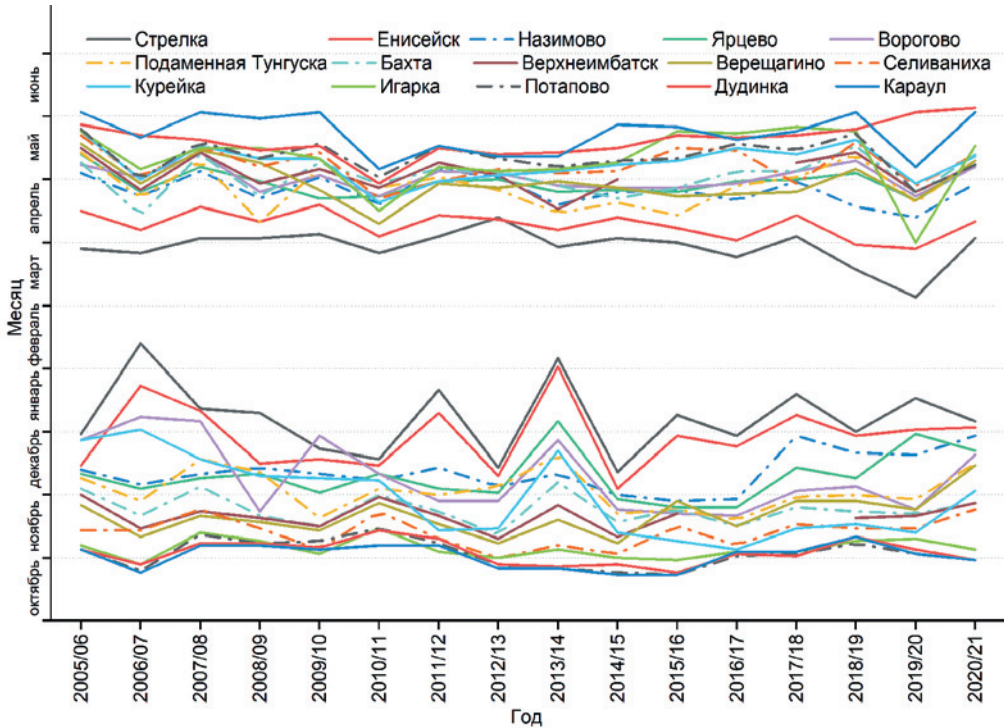


Рис. 3. Динамика дат начала и окончания ледостава на Нижнем Енисее.

Fig. 3. Dynamics of the beginning and the end dates of freeze-up and ice break-up on the Lower Yenisei.

Самое большое число случаев навалов льда за период наблюдений отмечено в районе с. Ворогово, наименьшее – в с. Курейка (табл. 4). Как показывает анализ взаимосвязи навалов льда и заторов, в большинстве случаев навалы льда формируются после прорыва затора или сразу после окончания ледостава [19]. Закономерность роста количества навалов и торосов льда замечена на большей части исследуемых гидрологических постов: пгт Стрелка, с. Назимово, с. Ярцево, с. Ворогово, д. Бахта, с. Верхнеимбатск, с. Курейка, с. Потапово и г. Дудинка.

Временная изменчивость показателей фазы замерзания и вскрытия.

Для анализа временной изменчивости для каждого поста рассчитаны значения модульных коэффициентов для продолжительности фазы замерзания и вскрытия, дат появления и исчезновения ледовых явлений, становления и исчезновения ледостава на реке. Затем были построены графики отклонения модульных коэффициентов от среднего за исследуемый период по каждому посту. Также для этих параметров рассчитаны коэффициенты вариации и асимметрии.

Зима 2013–2014 гг. была теплой и малоснежной, что отразилось на значениях модульных коэффициентов (рис. 2а) и на датах начала становления ледостава (рис. 3), они сместились на более поздние. Видимый скачок в 2013–2014 гг. зафиксирован на графиках становления ледостава на постах выше Верхнеимбатска. На постах, расположенных южнее, малоснежность повлияла на становление ледостава и продолжительность фазы замерзания. При больших снегопадах и

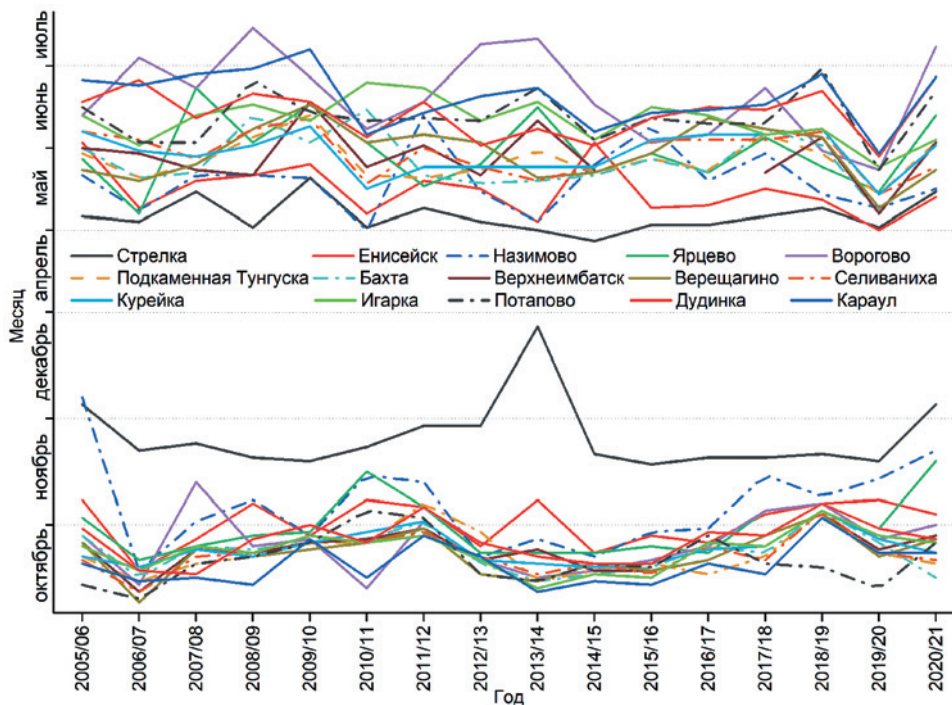


Рис. 4. Динамика дат начала и окончания ледовых явлений на Нижнем Енисее.
 Fig. 4. Dynamics of the beginning and the end dates of ice phenomena on the Lower Yenisei.

уже охлажденной воде снег, попадая в водоем, не тает, а образует кашеобразный слой – шугу. Впоследствии шуга формирует ледяные участки, которые смерзаются и образуют ледостав. Зимой 2013–2014 гг. снега было мало, что отразилось на более поздних датах становления ледостава и продолжительности фазы замерзания – она была длиннее (рис. 2а).

Наиболее сильная положительная аномалия температуры воздуха за последние 80 лет отмечена в зимний период 2019–2020 гг. на севере Евразии [20]. Это отразилось на графиках отклонения модульных коэффициентов для большей части гидрологических постов (рис. 2б). Очистление реки ото льда зимой 2019–2020 гг. также произошло намного раньше (рис. 4).

Следует отметить, что для зимы 2009–2010 гг. не прослеживается особенностей в графиках отклонения коэффициентов дат вскрытия и замерзания, хотя эта зима признана рекордно холодной за последние десятилетия [21].

Продолжительность ледовых явлений на реке на всех исследуемых постах имеет тренд на уменьшение, хотя этот тренд для пг Стрелка и с. Потاپово выражен незначительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования установлено, что изменение температуры воздуха за исследуемый период отражается на всех характеристиках ледовых явлений. Характер этих изменений, в основном, однозначен: на большей части территории даты замерзания смещаются на более поздние (в среднем на

неделю), а даты вскрытия практически не изменяются (в среднем на два дня раньше) и колеблются в одном диапазоне (начало мая), в связи с чем уменьшается длительность присутствия льда на Нижнем Енисее, за исключением пгт Стрелка. Также выявлено, что даты начала ледовых явлений практически не изменились, в среднем они начинаются позже на два дня. Даты окончания ледовых явлений сдвигаются на более ранние сроки (в среднем на неделю).

Аномально теплая зима 2019–2020 гг. значительно повлияла на даты вскрытия реки и на даты ее полного очищения ото льда. На 14 постах даты вскрытия сдвинулись на более ранние (в среднем на 18 дней), кроме одного из самых северных постов в г. Дудинка. Следующей зимой на всех 15 постах даты вскрытия сдвинулись на более поздние, в среднем также на 18 дней. Аналогичная ситуация наблюдалась для дат полного очищения реки ото льда: в 2019–2020 гг. в среднем ледовые явления заканчивались раньше на 21 день, а на следующую зиму даты вернулись обратно на более поздние, в среднем на 19 дней.

Гидрологический пост Стрелка значительно отличается от остальных исследуемых постов: почти на месяц позже здесь начинались ледовые явления за весь исследуемый период, но показатели ледостава таких отличий от остальных 14 постов при этом не имели. Отмечено, что за 2005–2021 гг. толщина льда демонстрировала тренд на уменьшение на большей части исследуемой территории, также на большей части постов увеличивалось число случаев с навалами и торосами льда. Продолжительность присутствия льда на реке на всех исследуемых постах имеет тренд на уменьшение, что соотносится с современными изменениями климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zuev V.V., Korotkova E.M., Uymanova V.A., Pavlinskiy A.V. Water level regime of the Maima river (Mountain Altai) in the context of modern climate changes // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. P. 012072.
2. Маргарян В.Г., Вершинин Д.А. Проявления изменения климата в ледовом режиме рек бассейна р. Дебед (Армения) // Геосферные исследования. 2021. № 1. С. 94–103.
3. Маргарян В.Г. Ледовый режим рек бассейна Дебед, Армения // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 2. С. 248–261.
4. Дмитриева В.А., Сушков А.И. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата // Вестник ВГУ. Сер. География. Геоэкология. 2023. № 2. С. 56–63.
5. Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География. 2014. № 3. С. 32–45.
6. Лобанов В.А., Горошкова Н.И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 55. С. 86–98.
7. Соколов А.А. Гидрография СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1952. 287 с.
8. Паромов В.В., Шантыкова Л.Н. Изменение характеристик ледового режима рек бассейна Верхнего Енисея // Лед и снег. 2010. № 2. С. 51–55.
9. Бураков Д.А., Ковшова Е.П., Ромасько В.Ю. Прогноз элементов ледового режима р. Енисей в осенне-зимний период в нижних бьефах высоконапорных ГЭС // Метеорология и гидрология. 2008. № 5. С. 93–102.
10. Антонов В.С. Ледовый показатель современной тенденции похолодания климата в низовьях Енисея // Проблемы Арктики и Антарктики. 1975. № 46. С. 84–90.

11. Соловьева З.С. Закономерности временной изменчивости сроков вскрытия низовьев и устьев рек Сибири. // Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. 1983. Т. 378. С. 113–122.
12. Волкова Д.Д., Румянцева Е.В. Многолетняя динамика ледового режима средних рек Арктической зоны Сибири. Теория и методы полярной науки: Материалы международной молодежной научной конференции по полярной геодезии, гляциологии, гидрологии и геофизике. Санкт-Петербург, 17–19 мая, 2018. С. 76–84.
13. Гинзбург Б.М. Сроки замерзания и вскрытия рек в конце XX века и возможные их изменения в XXI веке // Метеорология и гидрология. 2005. № 12. С. 88–97.
14. Агафонова С.А., Фролова Н.А., Василенко А.Н., Широкова В.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках арктической зоны европейской территории России // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2016. № 6. С. 41–49.
15. Бузин В.А., Копалиани З.Д. Наводнения на реках России при современных тенденциях изменения климата // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2007. № 5. С. 43–54.
16. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 242 с.
17. Агафонова С.А., Айбулатов Д.Н., Фролова Н.А., Козлов Д.В. Современное изменение ледового режима рек бассейна Волги // Природообустройство. 2014. № 3. С. 60–62.
18. Сидристый Д.В. Особенности эксплуатации Дудинского порта в период весеннего ледохода // Мат-лы VII Всеросс. научно-техн. конф. молодых исследователей: Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности. Волгоград, 20–25 апреля 2020. С. 77–78.
19. Горошкова Н.И., Стриженов А.В. Затопление льда и другие опасные ледовые явления на реках Ленинградской области // Заметки ученого. 2021. № 6–1. С. 530–537.
20. Frolov D. Peculiarities of weather and ground freezing conditions in Siberia and Russian Arctic in winter and spring period of 2019/2020 // *Journal of Physics*. Conference Series. 2020. Vol. 1614. P. 1–5.
21. Харламова Н.Ф. Долговременные климатические изменения на внутриконтинентальной территории России (Алтайский регион) // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 3–1. С. 133–140.

REFERENCES

1. Zuev V.V., Korotkova E.M., Uymanova V.A., Pavlinskiy A.V. Water level regime of the Maima River (Mountain Altai) in the context of modern climate changes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. P. 012072.
2. Margaryan V.G., Vershinin D.A. Manifestations of climate change in the ice regime of the rivers of the Debed River basin (Armenia). *Geosphere research*. 2021. № 1. P. 94–103 (In Russ.).
3. Margaryan V.G. Ice regime of the rivers of the Debed basin, Armenia. *Ice and Snow*. 2021. Vol. 61. № 2. P. 248–261 (In Russ.).
4. Dmitrieva V.A., Sushkov A.I. Thermal Regime in the Voronezh Region in a Changing Climate. *Proceedings of VSU, Series: Geography. Geoecology*. 2023. № 2. P. 56–63 (In Russ.).
5. Vuglinsky V.S. Assessment of changes in the characteristics of the ice regime of water bodies for various regions of the country in modern climatic conditions. *Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2014. № 3. P. 32–45 (In Russ.).
6. Lobanov V.A., Goroshkova N.I. Characteristics of ice regime of the rivers of the Sakha Republic (Yakutia) and their climate changes. *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019. № 55. P. 86–98 (In Russ.).
7. Sokolov A.A. Hydrography of the USSR. L.: Gidrometeoizdat, 1952. 287 p.
8. Paromov V.V., Shantykhova L.N. Change of ice regime characteristics on the rivers in the Upper Yenisei basin. *Ice and Snow*. 2010. № 2. P. 51–55.
9. Burakov D.A., Kovshova E.P., Romasko V.Y. Forecast of some components of the Yenisei River ice regime in the downstream of high-head hydroelectric power station. *Meteorology and hydrology*. 2008. No. 5. P. 93–102 (In Russ.).
10. Antonov V.S. Ice indicator of the current trend of climate cooling in the lower reaches of the Yenisei. *Problems of the Arctic and Antarctic*. 1975. №. 46. P. 84–90 (In Russ.).
11. Solovyova Z.S. Patterns of temporal variability in the timing of opening of the lower reaches and mouths of Siberian rivers. *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute*. 1983. Vol. 378. P. 113–122 (In Russ.).

12. Volkova D.D., Rumyantseva E.V. Long-term dynamics of the ice regime of medium-sized rivers in the Arctic zone of Siberia. *Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics*. St. Petersburg May 17-19, 2018. P. 76–84 (In Russ.).
13. Ginzburg B.M. River freeze-up and breakup dates in the late 20th century and their possible changes in the 21st century. *Meteorology and hydrology*. 2005. № 12. P. 88–97 (In Russ.).
14. Agafonova S.A., Frolova N.L., Vasilenko A.N., Shirokova V.A. Ice regime and dangerous hydrological phenomena on the rivers of the Arctic zone of the European territory of Russia. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2016. № 6. P. 41–49 (In Russ.).
15. Buzin V.A., Kopaliani Z.D. The inundations on the rivers of Russia with the current weather-change trends to the alteration of climate. *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2007. № 5. P. 43–54 (In Russ.).
16. Donchenko R.V. Ice regime of rivers in the USSR. L.: Gidrometeoizdat, 1987. 242 p. (In Russ.).
17. Agafonova S.A., Aibulatov D.N., Frolova N.L., Kozlov D.V. Contemporary changes in the ice regime of water in the Volga basin. *Nature Management*. 2014. № 3. P. 60–62 (In Russ.).
18. Sidristy D.V. Features of the operation of the Dudinsky port during the spring ice drift. *Materials of the VII All-Russian (with international participation) scientific and technical conference of young researchers: Current problems of construction, housing and communal services and technosphere safety*. Volgograd, April 20-25, 2020. P. 77–78 (In Russ.).
19. Goroshkova N.I., Strizhenok A.V. Ice jam and other dangerous ice phenomena on the rivers of the Leningrad region. *Notes of a scientist*. 2021. No. 6-1. P. 530–537 (In Russ.).
20. Frolov D. Peculiarities of weather and ground freezing conditions in Siberia and Russian Arctic in winter and spring period of 2019/2020. *Journal of Phisies*. Conference Series. 2020. Vol. 1614. P. 1–5 (In Russ.).
21. Kharlamova N.F. Long-Term Climatic Changes in the Intercontinental Territory of Russia (Altai Region). *News of the Altai State University*. 2010. № 3-1. P. 133–140 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Зуев Владимир Владимирович, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; ORCID: 0000-0002-2351-8924; e-mail: vzuev@list.ru

Уйманова Валерия Александровна, канд. геогр. наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; доцент кафедры гидрологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; ORCID: 0000-0002-1248-7122; e-mail: skvaleri91@mail.ru

Павлинский Алексей Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; ORCID: 0000-0002-0426-9555; e-mail: wf@inbox.ru

About the authors:

Vladimir V. Zuev, Corresponding Member of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Principal Researcher, Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, pr. Akademichesky, 10/3, Tomsk, 634055, Russia; ORCID: 0000-0002-2351-8924; e-mail: vzuev@list.ru

Valeria A. Uymanova, Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, pr. Akademichesky, 10/3, Tomsk, 634055, Russia; Associate Professor, Department of Hydrology, National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36; Tomsk, 634050, Russia; ORCID: 0000-0002-1248-7122; e-mail: skvaleri91@mail.ru

Aleksey V. Pavlinsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, pr. Akademichesky, 10/3, Tomsk, 634055, Russia; ORCID: 0000-0002-0426-9555; e-mail: wf@inbox.ru

Обоснование ферментно-кавитационной обработки осадков сточных вод

В.А. Домрачева , Д.В. Васильковская 

 tina-domra@yandex.ru

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. На современном этапе развития общества защита поверхностных и подземных водоемов от загрязнения сточными водами является важной задачей. Основное направление – создание эффективных технологий по сбору и очистке хозяйственно-бытовых, производственных и смешанных сточных вод, позволяющих использовать образующийся в ходе очистки осадок в зависимости от его состава и способа переработки. Повышение качества осадков сточных вод зависит от выбора метода его стабилизации. **Методы.** Проведен анализ нормативно-правовых и технических документов, регламентирующих деятельность по обращению с осадками сточных вод. В соответствии с нормативными документами определен состав осадка сточных вод и выбор метода его обработки в зависимости от использования. **Результаты.** Изучен состав осадка хозяйственно-бытовых сточных вод на очистных сооружениях водоканала Иркутской области. Предложено использовать осадки сточных вод в качестве удобрения. Анализ методов стабилизации позволил выбрать и обосновать наиболее перспективный ферментно-кавитационный метод, позволяющий получать удобрение высокого качества.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водоочистка, сточные воды, метантенки, компостирование, удобрения, биогаз, ферменты, микроорганизмы, кавитация.

Для цитирования: Домрачева В.А., Васильковская Д.В. Обоснование ферментно-кавитационной обработки осадков сточных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 114–122. DOI:10.35567/19994508-2024-3-114-122.

Дата поступления 04.12.2023.

RATIONALE FOR ENZYMATIC CAVITATION TREATMENT OF SEWAGE SLUDGE

Valentina A. Domracheva , Daria V. Vasilkovskaya 

 tina-domra@yandex.ru

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

ABSTRACT

Relevance. At the present stage of development of society, protecting surface and underground water bodies from wastewater pollution is an important task. The main direction is the creation of effective technologies for the collection and purification of domestic, industrial and mixed wastewater, allowing the use of the sludge formed during treatment, depending on its composition and method of processing. Improving the quality of sewage sludge depends on the choice of method for its stabilization. **Methods.** An analysis of regulatory and technical documents regulating activities for the management of sewage sludge was carried out. In accordance with regulatory documents, the composition of sewage sludge and the choice of its treatment method are determined depending on the use. **Results.** An analysis of documents regulating wastewater

sludge management activities was carried out. The composition of domestic wastewater sludge at water treatment plants in the Irkutsk region was studied. It is proposed to use sewage sludge as a fertilizer. Analysis of stabilization methods made it possible to select and justify the most promising enzyme-cavitation method, which makes it possible to obtain high-quality fertilizer.

Keywords: water treatment, activated sludge, stabilization of sewage sludge, methane tanks, composting, fertilizers, biogas, enzymes, microorganisms, cavitation.

For citation: Domracheva V.A., Vasilkovskaya D.V. Rationale for enzymatic cavitation treatment of sewage sludge. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 114–122. DOI:10.35567/19994508-2024-3-114-122.

Received 04.12.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы очистки сточных вод сопровождаются накоплением осадка. Осадок традиционно отправляют на иловые поля, где он в течение трех лет вылеживается, дренирует и проходит необходимые стадии солнечной просушки либо замораживания. Затем осадки, как правило, отправляют на полигон или в шламонакопитель. При этом условия размещения осадков не исключают загрязнения ими поверхностных и подземных вод, почв, растительности [1].

Важный фактор в функционировании иловых площадок – прямая зависимость от климатической нагрузки – температуры воздуха и количества осадков. В результате эксплуатация иловых площадок сопровождается снижением эффективности и последующим загрязнением окружающей среды, что в итоге создает объекты накопленного экологического вреда [2].

Анализ литературных данных [3–13] позволяет сделать вывод о том, что основные тенденции практики использования продуктов, полученных из осадка сточных вод, сводятся к использованию их энергетического потенциала или применению в сельском хозяйстве в качестве удобрения. Авторы А.С. Межевова, А.И. Беляев [14], изучавшие состав осадка методом сканирующей электронной микроскопии, подтверждают эффективность его использования в качестве удобрений, полученный эффект связывают с рыхлой и неоднородной структурой, что обеспечивает его влагосорбирующие и влагоудерживающие свойства.

Традиционные технологии выдерживания осадка на иловых картах или на полигоне не исключают вероятность возникновения неблагоприятных изменений осадочных масс и негативного воздействия на окружающую среду. При использовании осадков сточных вод необходимо знать их состав, а также обеспечить соответствие нормативным требованиям, что заставляет предприятия более тщательно подходить к вопросам повышения качества осадков сточных вод и поиска эффективных технологических решений. При этом повышение качества осадков сточных вод зависит от выбора метода стабилизации.

В рамках проведенного исследования была поставлена задача определить технологии, способные повысить качество осадков хозяйственно-бытовых сточных вод, изучить состав осадка и обосновать перспективный метод стабилизации. Цель работы – обосновать ценность осадков сточных вод, образуемых на водоканале Иркутской области, повысить эффективность их обработки.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбран осадок, образованный в результате очистки хозяйственно-бытовых сточных вод, одного из предприятий водоканала Иркутской области. Обработку осадка на предприятии производят следующим способом: после откачки из первичных отстойников со дна и поверхности зеркала, вся собранная фракция направляется в отстойник-усреднитель, где уложена система дырчатых труб для аэрации осадка, туда же подается избыточный активный ил. Далее осадок направляется сначала в цех механического обезвоживания, а потом на иловые площадки, где в течение 2–3 лет проходит стадии стабилизации и подготовки к утилизации. Дополнительно производится реагентное обеззараживание.

Нормативные документы методов испытания осадка сточных вод: ГОСТ 26713-85¹; МУ по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства; МУ по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом; МУК 4.2.2661-10²; МУК 4.2.3695-21³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Осадки сточных вод состоят из избыточного активного ила, образуемого на стадии биологической очистки и сырого осадка из первичных отстойников механической стадии очистки, причем, до 98 % состава осадков приходится на избыточный ил. Обработка осадков может проходить совместно или раздельно [15].

Результаты анализа состава двух групп осадков сточных вод представлены в таблице.

По своему составу данный осадок может быть использован в качестве удобрения или питательного почвогрунта. Полученный продукт имеет невысокое содержание углеродсодержащих веществ, т. к. массовое содержание органики составляет 36,1 %, но этого количества достаточно для его применения в сельском хозяйстве. Осадок обладает низким содержанием металлов и содержит необходимое количество биогенных элементов. Нейтральный показатель pH среды способствует поддержанию нормальной реакции среды в почве. Содержание влаги составляет 61,1 %, это сыпучий продукт, удобный для применения.

В настоящее время деятельность по обращению с осадками сточных вод регулируется, с одной стороны, отраслевыми документами водоотведения, с другой, – законодательством Российской Федерации об обращении с отходами производства и потребления⁴. Долгое время осадки сточных вод, несмотря на свои полезные свойства, приравнивали к отходам. С марта 2023 г. вступила в действие статья 51.1 Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране

¹ ГОСТ 26713-85. Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка. Утв. и введ. в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 19 декабря 1985 г. № 4213.

² МУК 4.2.2661-10. Методы санитарно-паразитологических исследований. Утв. Главным государственным санитарным врачом РФ от 2010.07.2023. Применяется с 2010.07.2023.

³ МУК 4.2.3695-21. Методы биологического контроля почвы. Утв. Главным государственным санитарным врачом РФ от 2021.06.2002. Применяется с 2021.06.2002.

⁴ Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 04.08.2023) «Об отходах производства и потребления». Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102053807>.

окружающей среды», которая регламентирует требования по обращению с побочными продуктами производства и при удовлетворительном качестве обработки допускает приравнять осадки сточных вод к побочным продуктам производства. Согласно приведенному определению, побочный продукт производства – это продукт, образуемый в результате производства, но не являющийся его целью, который пригоден для использования в качестве сырья или продукции⁵. Это нововведение значительно облегчает жизнь водохозяйственным предприятиям, т. к. исключает проблемы утилизации иловых осадков на полигон. Однако побочный продукт должен найти свое применение в течение трех лет, иначе он признается отходом. В этом случае предприятие обязано утилизировать отход в течение 11 месяцев со дня признания или, при неисполнении этого требования, внести значительную плату за негативное воздействие на окружающую среду. Сложившаяся ситуация добавляет актуальности проблеме утилизации осадков сточных вод и стимулирует предприятия более ответственно подходить к вопросам повышения качества осадков сточных вод и поиска эффективных технологических решений.

Таблица. Характеристика обезвоженного осадка сточных вод
Table. Characteristics of the dehydrated wastewater sludge

Компонент		Фактическое содержание, мг/кг	Допустимое содержание ¹ , мг/кг		
			Группа I	Группа II	
Кадмий		0,57	15	15	
Хром		5,0	10	10	
Ртуть		0,319	7,5	7,5	
Свинец		10	250	500	
Никель		10	200	400	
Цинк		200	1750	3500	
Медь		122,1 1	750	1500	
Массовая доля (%)	влаги	61,1	не менее 20		
	органических веществ	36,1			
	азота общего	3,78			не менее 0,6
	фосфора общего	2,99			не менее 1.5
рН		7,6 ед.рН	5,5-8,5		
Индекс БГКП		1*101	1-9		
Цисты кишечных палочек и патогенных простейших		не обнаружено	не допускается		
Личинки и куколки синантропных мух		не обнаружено	не допускается		
Наличие жизнеспособных яиц и личинок гельминтов		не обнаружено	не допускается		

⁵ Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102074303>.

Требования к обработанным осадкам, используемым в качестве побочной продукции, определяются следующими нормативно-техническими документами: ГОСТ Р 54534-2011⁶; ГОСТ Р 17.4.3.07⁷; СанПиН 2.1.3684-21⁸; а также техническими условиями на получаемый продукт.

При использовании осадков сточных вод в виде удобрения применение методов стабилизации является обязательным требованием. Методы стабилизации направлены на разложение органической части составляющих осадка до простых соединений, имеющих длительный период ассимиляции окружающей средой, что обеспечивает стабильность свойств осадка. Наиболее широко применяемыми и подходящими для больших объемов осадка являются биологические методы стабилизации (метод метанового брожения, аэробная стабилизация, компостирование, ферментно-кавитационная обработка). Все они имеют свои преимущества и недостатки. Так, метод метанового брожения успешно справляется с поставленными задачами стабилизации, но требует больших эксплуатационных затрат на поддержание температуры и перемешивание осадка, полученный продукт трудно поддается обезвоживанию, но пригоден для полива сельскохозяйственных культур в качестве удобрения [3]. Полученный биогаз требует обязательной утилизации, т. к. газы брожения пожаро- и взрывоопасны, а также обладают токсичным действием, этот процесс может проходить только при полной герметизации оборудования, строгом контроле уровня безопасности на производстве.

Аэробная стабилизация, в отличие от предыдущего способа, протекает быстрее, органический материал осадка разлагается и становится стабильным, т. е. сохраняет свою структуру и не подвержен дальнейшему разложению [16]. Метод требует затрат на постоянную подачу кислорода, а его эффективность зависит от температурных условий. В климатических условиях Иркутской области в зимний период из-за пониженной температуры и переохлаждения осадка эффективность аэробной стабилизации снижается и требует дополнительного подвода тепла к реактору.

Компостирование или биотермическая обработка осадка разлагает органические соединения до простых веществ и уничтожает патогенную микрофлору. Основные проблемы данного метода заключаются в его длительности и трудоемкости, процесс требует постоянных ворошений и добавки структурообразующих материалов.

Метод ферментно-кавитационной обработки объединяет физические и биологические принципы обработки осадка, сочетает в себе использование ферментов и создание кавитационных условий для разрушения клеточной

⁶ ГОСТ Р 54534-2011 Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. Утв. и введен в действие приказом Росстандарта от 28 ноября 2011 г. № 613-ст, введ. 2013.01.2001.

⁷ ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. М.: Стандартинформ, 2008.

⁸ 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».

структуры осадка. Кавитационная обработка может быть реализована различными способами: с применением ультразвуковых колебаний для создания кавитации в осадках сточных вод; гидродинамического диспергатора или гидроциклона для создания кавитационных явлений [17, 18].

Кавитация – физический процесс образования разрывов пузырьков в жидкостях в результате понижения давления. При разрыве или схлопывании пузырька воздуха выделяется большое количество энергии, которая создает интенсивное воздействие на осадок, это способствует разрушению его коллоидной структуры, что увеличивает влагоотдачу. В результате такого действия клетки микроорганизмов, составляющие 90 % осадка сточных вод, становятся ядрами кавитации и разрываются с высвобождением богатого ферментами внутриклеточного вещества. Ферменты стимулируют биологическое разложение компонентов осадка, что приводит к уменьшению массы сырого осадка и увеличению биомассы активного ила.

Принципиальная схема реализации ферментно-кавитационного метода представлена на рисунке [19]. Процесс стабилизации протекает в реакторах башенного типа, куда нагнетается суспензия воздуха, осадка и воды. Вертикальное исполнение предполагает несколько циклов прохождения осадка через реактор. Воздух нагнетается посредством эжекторов, которые работают по принципу водоструйных насосов, что помогает экономить энергию на аэрацию.

Установлено, что температура смеси в емкостях обеспечивается за счет собственной экзотермической реакции и постоянно поддерживается в пределах 25–40 °С [20].

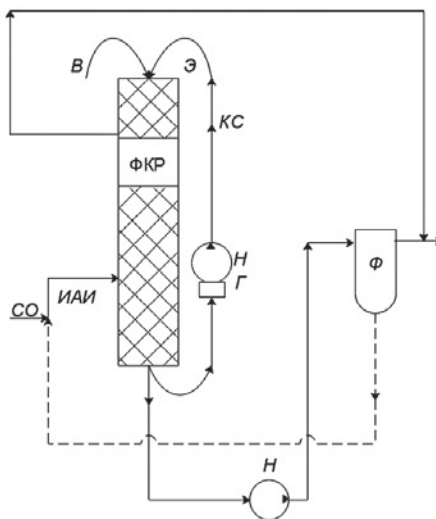


Рисунок. Принципиальная схема реализации ферментно-кавитационного метода: В – воздух, Э – эжектор, Н – насос, Г – генератор, Ф – фильтр, КС – кавитационная среда; СО – сырой осадок, ИАИ – избыточный активный ил; ФКР – ферментно-кавитационный реактор.

Figure. Schematic diagram of the implementation of the enzyme-cavitation method. В is air; Э is an ejector; Н is a pump; Г is generator; Ф is a filter; КС is cavitation medium; СО is wet sludge; ИАИ is excessive active sludge; ФКР is a ferment/cavitation reactor.

Разработанная технология ферментно-кавитационной обработки илового осадка [20] позволяет эффективно сократить его объем и увеличить влагоотдачу. После обработки указанным методом на выходе получается биологически стабильный осадок, не имеющий неприятного запаха, обеззараженный, с полной дегельминтизацией. Осадок имеет высокую степень влагоотдачи, что позволяет впоследствии обезводить его как в естественных условиях, например, на иловых картах в течение 3–6, так и с использованием механического обезвоживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение в действие статьи 51.1 в ФЗ № 7 «Об охране окружающей среды» способствует более ответственному подходу предприятий к вопросам обработки осадков сточных вод. В статье проанализирован опыт использования осадков сточных вод и способы их переработки. Изучен состав осадков сточных вод водоканала Иркутской области. Предложен способ использования осадка в виде удобрения для сельскохозяйственных культур. Рассмотрены методы стабилизации осадков сточных вод, определен наиболее перспективный метод биологической стабилизации осадка сточных вод – ферментно-кавитационный.

Использование ферментно-кавитационного метода направлено на обеззараживание осадка от патогенной микрофлоры, обезвреживание токсичных элементов осадка, улучшение его влагоотдающих свойств, что позволяет достигать высокой эффективности удаления органических загрязнений и повышать степень стабилизации осадка. Особенности конструкции обеспечивают экономичную эксплуатацию оборудования, вертикальное исполнение экономит занимаемые площади, а закрытая конструкция обеспечивает соблюдение санитарных требований.

Таким образом, при выборе наиболее эффективного способа стабилизации осадка сточных вод следует учитывать его характеристики, операционные параметры и требования к обработке. Ферментно-кавитационный метод является перспективным, обладает высокой эффективностью, адаптируемостью и экологической безопасностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мироненко О.В., Магомедов В. К., Паныкин А.В., Суворова О.К., Федорова Е.А. Гигиеническая оценка воздействия выбросов из тела полигона для складирования осадков сточных вод на здоровье населения // Экология человека. 2020. № 11. С. 4–13. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-11-4-13.
2. Дрегуло А.М. Влияние климатических факторов на эксплуатацию природно-технических систем обработки отходов водоотведения // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2020. № 6. С. 32–41.
3. Благоразумова А.М. Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод: уч. пособие. СПб.: Лань, 2014. 208 с.
4. Графова Е.О., Паршин Н.В. Исследование методов обработки осадков сточных вод петрозаводских очистных сооружений // Resources Technology. 2019. № 4. С. 94–115.
5. Новикова О.К. Обработка осадков сточных вод: учеб.-метод. пособие. Гомель: БелГУТ, 2015. 96 с.
6. Смирнов Ю.Д., Сучкова М.В. Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 3 (79). С. 16–25. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25.
7. Межевова А.С., Берестнева Ю.В., Бикметова К.Р. Апробация органоминерального удобрения на основе осадков сточных вод // Агрехимический вестник. 2020. № 6. С. 71–74.

8. Петрова Т.А., Рудзиш Э. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 767–776. DOI:10.31897/PMI.2021.5.6.
9. Межевова А.С. Использование илового осадка сточных вод при возделывании сафлора красивого на светло-каштановых почвах Волгоградской области // Юг России: экология, развитие. 2020. № 3 (56). С. 43–52. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-3-43-52.
10. Тиньгаев А.В., Чепрунова Ю.В. Влияние поллютантов в почвогрунтах агроландшафта рекультивируемого полигона на сельскохозяйственные культуры // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14. № 2. С. 373–386. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-2-373-386.
11. Маненко А.К., Ткаченко Г.М., Касиян О.П., Юрченко С.Т. Гигиеническое обоснование возможности использования ила из сооружений по очистке сточных вод в качестве органического удобрения // Гигиена и санитария. 2020. № 3. С. 259–264. DOI: 10.33029/0016-9900-2020-99-3-259-264.
12. Аубакирова И.У. Использование осадка водоочистных сооружений при производстве строительных материалов // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. №4 (84). С. 32–37. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.4.32-37.
13. Герасимов Г.Н. Обработка осадков сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. № 12. С. 67–71.
14. Межевова А.С., Беляев А.И. Нетрадиционные элементы технологии возделывания сельскохозяйственных культур с использованием удобрений мелиорантов // Юг России: экология, развитие. 2022. №3 (64). С. 187–196. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-3-187-196.
15. Межевова, А.С., Новиков А.Е. Состав, структура и морфология осадка сточных вод // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2021. № 1 (61). С. 389–399.
16. Хисамеева Л.Р., Селюгин А.С., Абитов Р.Н. и др. Обработка осадков городских сточных вод. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. 105 с.
17. Конюхова М.М. Ультразвуковая деструкция загрязнителей в природе воде // Инновации и инвестиции. 2021. № 6. С. 162–167.
18. Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуйков А.В. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) // Известия Томского политехнического университета. 2022. № 9. С. 209–218. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3623.
19. Пындак В.И., Степкина Ю.А., Степкин А.А. Обоснование ферментно-кавитационного метода переработки хозяйственно-бытовых стоков с получением удобрений-мелиорантов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2013. №3 (31). С. 183–189.
20. Степкина Ю.А. Совершенствование технологий и систем обработки осадка при очистке сточных вод, получение и апробация комплексного удобрения: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Волгоград, 2009. 23 с.

REFERENCE

1. Mironenko O.V., Magomedov V.K., Pankin A.V., Suvorova O.K., Fedorova E.A. Hygienic assessment of the impact of emissions from a landfill for storing sewage sludge on public health. *Human Ecology*. 2020. No. 11. Pp. 4–13. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-11-4-13 (In Russ.).
2. Dregulo A.M. Influence of climatic factors on the operation of natural-technical wastewater treatment systems. *Bulletin of Moscow University*. Ser. 5. Geography. 2020. No. 6. Pp. 32–41 (In Russ.).
3. Blagorasumova A.M. Treatment and dewatering of municipal wastewater sludge: textbook. allowance. St. Petersburg: Lan, 2014. 208 p. (In Russ.).
4. Grafova E.O., Parshin N.V. Study of methods for treating sewage sludge from Petrozavodsk wastewater treatment plants. *Resources Technology*. 2019. No. 4. Pp. 94–115 (In Russ.).
5. Novikova O.K. Treatment of sewage sludge: educational method. manual Gomel: BelGUT, 2015. 96 p. (In Russ.).
6. Smirnov Y.D., Suchkova M.V. Prospects for the beneficial use of wastewater sludge combustion ash in the national economy. *Water and ecology: problems and solutions*. 2019. No. 3 (79). Pp. 16–25. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25 (In Russ.).
7. Mezhevova A.S., Berestneva Yu.V., Bikmetova K.R. Approbation of organomineral fertilizer based on sewage sludge. *Agrochemical Bulletin*. 2020. No. 6. Pp. 71–74 (In Russ.).

8. Petrova T.A., Rudzish E. Recultivation of technogenically disturbed lands using sewage sludge as ameliorants. *Newsletter of the Mining Institute*. 2021. Vol. 251. Pp. 767–776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.6 (In Russ.).
9. Mezheva A.S. Use of sewage sludge in the cultivation of safflower on light chestnut soils of the Volgograd region. *South of Russia: ecology, development*. 2020. No. 3 (56). Pp. 43–52. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-3-43-52 (In Russ.).
10. Tingaev A.V., Cheprunova Y.V. The influence of pollutants in the soils of the agricultural landscape of the recultivated landfill on agricultural crops. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2022. T. 14. No. 2. Pp. 373–386. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-2-373-386 (In Russ.).
11. Manenko A.K., Tkachenko G.M., Kasiyan O.P., Yurchenko S.T. Hygienic justification for the possibility of using sludge from wastewater treatment facilities as an organic fertilizer. *Hygiene and Sanitation*. 2020. No. 3. Pp. 259–264. DOI: 10.33029/0016-9900-2020-99-3-259-264 (In Russ.).
12. Aubakirova I.U. Use of sludge from water treatment facilities in the production of building materials. *Water and ecology: problems and solutions*. 2020. No. 4 (84). Pp. 32–37. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.4.32-37 (In Russ.).
13. Gerasimov G.N. Treatment of sewage sludge. *Water supply and sanitary technology*. 2008. No. 12. Pp. 67–71 (In Russ.).
14. Mezheva A.S., Belyaev A.I. Non-traditional elements of technology for cultivating agricultural crops using ameliorant fertilizers. *South of Russia: ecology, development*. 2022. No. 3 (64). Pp. 187–196. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-3-187-196 (In Russ.).
15. Mezheva, A.S., Novikov A.E. Composition, structure and morphology of sewage sludge. *News of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2021. No. 1 (61). Pp. 389–399 (In Russ.).
16. Khisameeva L.R., Selyugin A.S., Abitov R.N. et al. Treatment of urban wastewater sludge. M.: IP Ar Media, 2022. 105 p. (In Russ.).
17. Konyukhova M.M. Ultrasonic destruction of pollutants in natural water /M. M. Konyukhova -Text: direct innovations and investments. 2021. No. 6. Pp. 162–167 (In Russ.).
18. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., Zhuikov A.V. Current state of use of cavitation technologies (brief review). *News of Tomsk Polytechnic University*. 2022. No. 9. Pp. 209–218. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3623 (In Russ.).
19. Pyndak V.I., Stepkina Y.A., Stepkin A.A. Justification of the enzyme-cavitation method for processing household wastewater to obtain ameliorant fertilizers. *News of the Nizhnevolsk Agro-University Complex*. 2013. No. 3 (31). Pp. 183–189 (In Russ.).
20. Stepkina Yu.A. Improving technologies and systems for treating sludge during wastewater treatment, obtaining and testing complex fertilizers: abstract of the candidate thesis. Volgograd, 2009. 23 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Домрачева Валентина Андреевна, д-р техн. наук, профессор, кафедра обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, И-122; e-mail: tina-domra@yandex.ru

Васильковская Дарья Витальевна, магистрант, кафедра обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, И-122; ORCID: 0009-0008-6177-3003; e-mail: Vasilkovskaya.d@yandex.ru

About the authors:

Valentina A. Domracheva, Doctor of Engineering Sciences, Professor, S.B. Leonov Department of Mineral Processing and Environmental Protection, Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova, 83, Irkutsk, Russia; e-mail: tina-domra@yandex.ru

Daria V. Vasilkovskaya, Postgraduate Student, S. B. Leonov Department of Mineral Processing and Environmental Protection, Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova, 83, Irkutsk, Russia; ORCID: 0009-0008-6177-3003; e-mail: Vasilkovskaya.d@yandex.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Manuscripts are reviewed and edited in RosNIIVKh editorial office.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакторы: Т.М. Принцева, Н.А. Валек

Подписано в печать 24.06.2024. Дата выхода в свет 08.07.2024.

Формат 70x100^{1/16}. Усл. печ. л. 7,75. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «ДжиЛайм»,

юридический адрес: 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира 37-25.

Тел.: +7(343)362-42-28, www.glime.ru, e-mail: g_lime@mail.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

Адрес: 117292, Москва, ул. Кедрова, дом. 8, корп. 1

Станции метро: Академическая, Профсоюзная

Телефон: 8 (499) 125-52-79

E-mail: water@favr.ru, <http://voda.mnr.gov.ru>

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ФГБУ РосНИИВХ – научное подразделение Федерального агентства водных ресурсов, создан для научного обеспечения государственных функций управления использованием 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.

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: 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23

Тел. главного редактора (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© ФГБУ РосНИИВХ

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

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

The journal is issued since 1999 6 times a year.

Address of the Publisher: Ul. Mira, 23, Ekaterinburg 620049 Russia
Chief Editor (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© FGBU RosNIIVKh

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

Индекс / Index 39076

