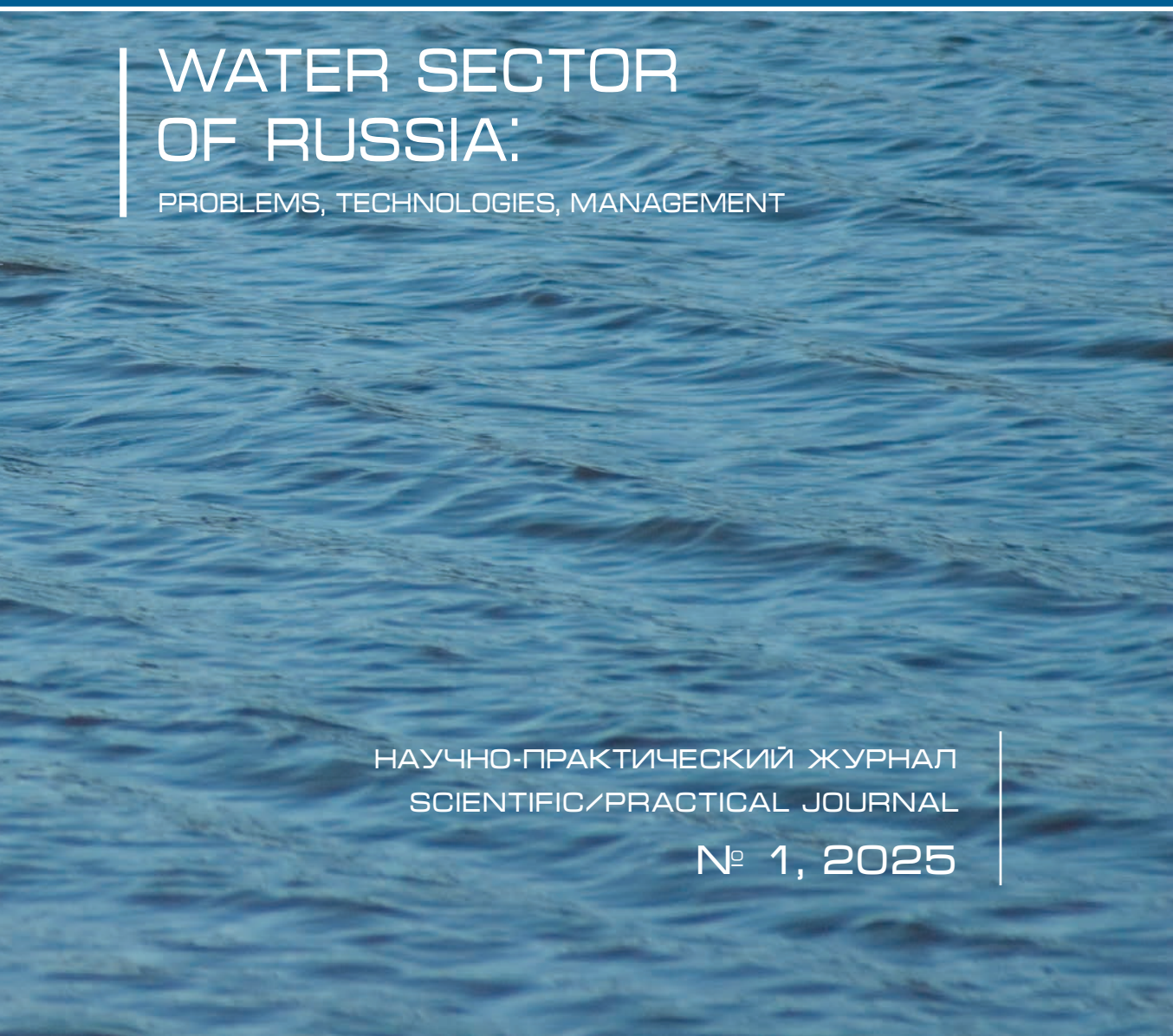
ISSN 1999-4508 (Print)
ISSN 2686-8253 (Online)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL
№ 1, 2025

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Лепихин А.П., д-р геогр. наук, профессор, 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 геогр. наук, профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
Веницианов Е.В., д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)
Гареев А.М., д-р геогр. наук, профессор, Башкирский государственный университет (Уфа, Россия)
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, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)
Ясинский С.В., д-р геогр. наук, Институт географии РАН (Москва, Россия)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ

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

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕДАКТОР

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 1, 2025

ЕКАТЕРИНБУРГ
YEKATERINBURG

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

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

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

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

Aleksey E. Kosolapov, 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. (Geographical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Evgeniy V. Venitsianov, Dr. Sc. (Physical/mathematical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems (Moscow, Russia)
Aufar M. Gareyev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Bashkir State University, Chair of Hydrology and Geo/ecology (Ufa, Russia)
Aleksandr T. Zinovyev, Dr. Sc. (Technical), Russian Academy of Sciences Siberian Branch Institute of Water and Environmental Problems (Barnaul, Russia)
Dmitriy V. Kozlov, Dr. Sc. (Technical), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
Aleksandr F. Nikiforov, Dr. Sc. (Chemical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Vladislav A. Rumyantsev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Limnology, (St. Petersburg, Russia)
Vladimir A. Seleznyev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of the Volga Basin Ecology Laboratory for Water Bodies Monitoring (Togliatti, Russia)
Yuri A. Fedorov, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Southern Federal University (Rostov-na-Donu, Russia)
Airat R. Khafizov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ufa, Russia)
Anatoliy V. Shevchuk, Dr. Sc. (Economic), Professor, Ministry of Economic Development of the Russian Federation Russian Academy of External Trade Board for Studying Productive Forces (Moscow, Russia)
Marina V. Shmakova, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Limnology (St. Petersburg, Russia)
Sergey V. Yasinskiy, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Geography (Moscow, Russia)

INTERNATIONAL BOARD

Bardukh K. Gabrielyan, Dr. Sc. (Biological), Professor, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (Yerevan, Armenia)
Günter Blöschl, Professor, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management (Vienna, Austria)
Dragan A. Savić, Professor, Centre for Water Systems University of Exeter (Exeter, Great Britain)
Carlo Gualteri, Professor, Federico II University (Napoli, Italy)
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

Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек
Сообщение 1. Восстановление полного массового расхода загрязнителей
В.Ю. Филимонов, О.В. Ловцкая.....5

О функции распределения наполнений и сбросов при расчетах регулирования стока методом стохастического динамического программирования
М.В. Болгов.....24

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Долгосрочные фазовые изменения озер Южного Приаралья
Ф.Я. Артыкова, С.Б. Калабаев.....40

Закономерности распространения наледей подземных вод, их связь с формированием речного стока и опасных явлений в Магаданской области
А.А. Землянскова, А.Н. Шихов, О.М. Макарьева, П.А. Никитина.....57

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Оценка допустимого отбора речных вод пойменными рыбхозами Белорусского Полесья
А.А. Волчек, Д.Н. Дашкевич, М.Ф. Кухаревич, С.И. Парфомук, С.В. Сидак, Н.Н. Шешко, Н.Н. Шпендик.....76

Динамика микробных сообществ в условиях активной хозяйственной деятельности на акватории Северного Каспия
Д.Г. Баубекова, Е.В. Колмыков, Е.М. Мелик-Багдасаров.....100

Экологическое состояние Воронежского водохранилища (обзор научных публикаций)
А.А. Елисеев, К.Ю. Силкин.....118

Требования к оформлению материалов.....131

CONTENT

WATER RESOURCES MANAGEMENT

Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: 1. Method for reconstructing the total mass flow rate.
V.Y. Filimonov, O.V. Lovtskaya.....5

On the function of fillings and discharges distribution in calculations of flow regulation by stochastic dynamic programming
M.V. Bolgov.....24

WATER RESOURCES, WATER BODIES

Long term phase changes in the South Aral Sea zone lakes
F.Y. Artykova, S.B. Kalabaev.....40

The patterns of spring aufeis distribution, their relation with river runoff formation and hazardous phenomena in the Magadan region
A.A. Zemlianskova, A.N. Shikhov, O.M. Makaryeva, P.A. Nikitina.....57

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

Assessment of permissible withdrawal of river waters by floodplain fish farms of the Belarusian Polesie
A.A. Volchek, D.N. Dashkevich, M.F. Kukharevich, S.I. Parfomuk, S.V. Sidak, N.N. Sheshko, N.N. Shpendik.....76

Dynamics of microbial communities under conditions of active economic activity in the water area of the North Caspian
D.G. Baubekova, E.V. Kolmykov, E.M. Melik-Bagdasarov.....100

Ecological status of Voronezh reservoir (review of scientific publications)
A.A. Eliseev, K.Y. Silkin.....118

Requirements for the articles to be accepted.....131

УДК: 556.535.3 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-5-23*

Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек

Сообщение 1. Восстановление полного массового расхода загрязнителей

В.Ю. Филимонов, О.В. Ловцкая

lov@iwep.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Качество речной воды является важнейшим фактором обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Диффузионный сток загрязнителей рек представляет наибольшую опасность, поскольку является неконтролируемым и нерегулируемым. Невозможность прямой оценки расхода загрязняющих веществ в процессах диффузного загрязнения требует фундаментальных исследований и разработки адекватных математических моделей, основанных на методах решения обратных задач. В представленной работе предложен метод расчета полного массового расхода консервативных загрязнителей, поступающих в водоток с участка водосбора. **Методы.** На основе интегрального представления стационарного одномерного уравнения переноса загрязнителя предложен метод расчета пространственного распределения полного массового расхода консервативных загрязняющих веществ. Для определения неизвестных параметров распределения использованы метод глобальной нелинейной оптимизации и метод Монте-Карло. **Результаты.** Применение метода нелинейной глобальной оптимизации позволило определить как значение полного массового расхода загрязняющего вещества на исследуемой территории, так и величину числа Пекле, входящего в уравнение адвекции-диффузии. На основе метода Монте-Карло показана устойчивость полученных результатов относительно случайных отклонений значений концентрации, когда неизвестные параметры определяются как средние из тысячи возможных реализаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водосборная территория, диффузное загрязнение, массовый расход, обратная задача, глобальная оптимизация, метод Монте-Карло.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20023 (https://rscf.ru/project/24-27-20023/).

Для цитирования: Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В. Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек. Сообщение 1. Восстановление полного массового расхода загрязнителей // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 5–23. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-5-23, EDN: BBABKI

© Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В., 2025

Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: 1. Method for reconstructing the total mass flow rate

Valery Y. Filimonov, Olga V. Lovtskaya

lov@iwep.ru

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

ABSTRACT

Relevance. The quality of river water is the most important factor in ensuring environmental safety and rational use of natural resources. Diffusion runoff of river pollutants is the most dangerous because it is uncontrolled and unregulated. The impossibility of directly assessing the consumption of pollutants in diffuse pollution processes requires fundamental research and the development of adequate mathematical models based on methods for solving inverse problems. The presented work proposes a method for calculating the total mass flow rate of conservative pollutants entering a watercourse from a catchment area. **Methods.** Based on the integral representation of the stationary one-dimensional equation of pollutant transport, a method for calculating the spatial distribution of the total mass flow rate of conservative pollutants in a catchment area is proposed. To determine the unknown distribution parameters, the global nonlinear optimization method and the Monte Carlo method were used. **Results.** The use of the nonlinear global optimization method allowed us to determine both the value of the total mass flow rate of the pollutant in the study area and the value of the Peclet number included in the advection-diffusion equation. Using the Monte Carlo method, the stability of the obtained results with respect to random deviations in concentration values is demonstrated when a thousand possible deviations are realized in a given interval.

KEYWORDS: catchment area, diffuse pollution, inverse problem, global optimization, Monte-Carlo method.

Funding. The research was supported by the RSF grant (project No. 24-27-20023, https://rscf.ru/project/24-27-20023/).

For citation: Filimonov V.Y., Lovtskaya O.V. Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: 1. Method for reconstructing the total mass flow rate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 1. P. 5–23. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-5-23, EDN: BBABKI

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время химическое загрязнение водных объектов приобретает глобальные масштабы во всем мире. При загрязнении поверхностных вод наибольшую опасность представляет диффузный сток (или неточечный сток) загрязняющих веществ, поступающих в русла рек с урбанизированных территорий, необорудованных свалок, сельскохозяйственных полей и животноводческих ферм, расположенных в пределах водосборной площади [1]. В отличие от точечных источников, диффузный сток не контролируется и не регулируется, а его негативное влияние на качество воды для малых рек более существенно, чем для крупных.

Качество речной воды характеризуется содержанием в ней растворенных веществ, определяемых по результатам анализа проб на исследуемом участке водотока. Однако этот показатель не дает информации о локализации источ-

ников загрязнения, их пространственном распределении и характеристиках массового расхода загрязнителя [2, 3]. Одним из способов решения данной проблемы является математическое моделирование водосборной территории [1]. Соответствующие методики, рассмотренные в работе [4], позволяют на основе цифровых моделей рельефа и почвенных карт рассчитывать вклад загрязняющих веществ на определенных территориях, а также моделировать сток. Однако этот подход требует чрезвычайно большого объема детальной информации о характеристиках водосборных площадей и представляет собой некую «эффективную» модель стока, которая реализуется с определенной вероятностью и не является универсальной. Альтернативным методом является расчет диффузного стока загрязняющих веществ непосредственно по измеренному распределению концентрации загрязнителя в русле, т. е. решение обратной задачи для уравнения адвекции-диффузии. В этом случае никакой информации о характеристиках водосборной территории не требуется. Как следствие, для практических нужд возникает необходимость создания простого метода определения стока загрязняющих веществ, не требующего большого объема эмпирических данных и легко реализуемого с использованием сравнительно небольшого количества результатов анализа химических проб.

Существующие на сегодняшний день методы решения обратных задач определения расхода консервативных загрязнителей реализуются на основе уравнения адвекции-диффузии с использованием заранее заданных тестовых функций пространственного распределения удельного массового расхода загрязняющего вещества. В ходе расчета обратной задачи осуществляется восстановление исходных функций с последующей проверкой результатов [5–13]. Однако идентификация источника загрязнения по конечному числу измеренных концентраций загрязняющих веществ является некорректной задачей, даже если предполагается, что его пространственное распределение известно. В цитируемых работах [5–13] целью исследования является восстановление распределения удельного массового расхода загрязняющего вещества, представляющего количество загрязнителя, поступающего в водоток за единицу времени на единицу длины русла (линейная плотность источника загрязнения). На данную зависимость не накладывается никаких ограничений, и исследователь не имеет априорной информации о поведении этой функции. Распределение удельного массового расхода воспроизводится только по данным распределения концентрации загрязнителя.

Следует заметить, что наряду с удельным массовым расходом важной характеристикой диффузного загрязнения является полный массовый расход, определяющий общее количество загрязняющего вещества, поступающего в водоток за единицу времени на исследуемом участке. Указанная величина является интегральной расходной характеристикой и, по сути, определяет конечную цель решения обратной задачи. В отличие от удельного массового расхода загрязнителя полный массовый расход монотонно возрастает на участке русла, что делает задачу его определения более предсказуемой и сужает класс исследуемых функций. Отметим, что работ, посвященных прямому сопостав-

лению данных реальных натурных измерений и данных по расчету диффузного стока, в доступной литературе обнаружить не удалось. Это обусловлено тем, что для корректного решения обратной задачи необходимо большое число натурных измерений концентрации загрязнителя на исследуемом участке водотока (сотни расчетных точек). В реальности это число незначительно и составляет, в лучшем случае, десятки расчетных точек.

Целью настоящего исследования является разработка метода восстановления распределения полного массового расхода консервативных загрязняющих веществ на основе имеющихся данных о распределении их концентрации.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Постановка задачи

При анализе процессов диффузного загрязнения малых равнинных рек разумно предположить, что в меженный период скорости течения и расходы воды вдоль русла изменяются незначительно. Тогда стационарное уравнение адвекции-диффузии удобно представить в обезразмеренном виде:

$$\frac{d\theta}{dz} - \frac{1}{\alpha}\frac{d^2\theta}{dz^2} = \tilde{\varphi}(z). \qquad (1)$$

Здесь введены в рассмотрение следующие обезразмеренные величины:

$$z = x/L,\ \theta = (c - c_A)/c_A,\ \alpha = VL/E,\ \tilde{\varphi}(z) = L\varphi(z)/Qc_A, \qquad (2)$$

где x – координата;

L – длина исследуемого участка водотока;

c – концентрация загрязнителя в точке x;

c_A – концентрация загрязнителя на верхнем створе;

V – скорость течения;

E – коэффициент продольной дисперсии;

Q – объемный расход воды;

φ – удельный массовый расход загрязнителя.

Кроме того, важно ввести в рассмотрение полный массовый расход загрязнителя в точке z:

$$\tilde{\Phi}(z) = \int_0^z \tilde{\varphi}(z)dz. \qquad (3)$$

Следует заметить, что эта зависимость является монотонно возрастающей, поскольку $\tilde{\varphi}(z)>0$ по определению. Далее важно проанализировать гидрологический аспект проблемы и обосновать постановку (1). Для адекватного описания процессов стока того или иного загрязнителя необходимо знать его постоянную составляющую (базовый сток), не связанную с осадками, паводками, процессами снеготаяния и т. п. (причины, обусловливающие эту составляющую стока, перечислены во введении). Как правило, эта величина определяется переносом загрязняющих веществ через почвенную фильтрацию и грунтовые воды [14]. Для ее определения наиболее корректно анализировать установившиеся потоки, т. е. стационарную задачу (1).

По результатам многочисленных исследований (в частности, [15–22]) анализы проб воды (отобранных в меженный период) показывают наличие участ-

ков ускоренного роста концентрации растворенного вещества, что связано с его непрерывным стоком с водосборной территории. В работе [16] установлено, что концентрация растворенного мышьяка увеличивается в 3,5 раза на участке около 80 км в бассейне р. Буэрхатун (Китай). В [17] показано, что концентрация меди в р. Эррен (Китай) увеличивается в пять раз на участке длиной 10 км. Согласно результатам [15], концентрация марганца в р. Барнаулке (Россия) монотонно увеличивается в три раза на протяжении 4,5 км. Такие участки являются потенциально опасными и требуют детального теоретического и практического изучения как источники повышенной антропогенной нагрузки.

Точное решение

Прямая задача. Целью расчета прямой задачи (1) является определение распределения концентрации загрязняющих веществ в водотоке по известной функции $\tilde{\varphi}(z)$. Если рассматривать задачу как полуэмпирическую, то в качестве граничных условий следует принять условия Дирихле, предполагая, что концентрация на нижнем участке известна из натурных измерений:

$$\theta(0) = 0,\ \theta(1) = \theta_1. \tag{4}$$

Для дальнейшего анализа в рассмотрение были введены следующие тестовые функции:

$$\tilde{\varphi}(z) = 0{,}2 + 0{,}3z - 0{,}25z^2, \tag{5}$$

$$\tilde{\varphi}(z) = 0{,}2e^z + 0{,}2z^4, \tag{6}$$

$$\tilde{\varphi}(z) = 0{,}2 + 0{,}2e^{-\left(\frac{z-0{,}3}{0{,}1}\right)^2} + 0{,}45e^{-\left(\frac{z-0{,}7}{0{,}3}\right)^2}. \tag{7}$$

Тестовые функции выбирали, исходя из следующих соображений. Распределение (5) близко к равномерному и определяет участок равномерного распределения удельного массового расхода загрязняющего вещества. Это может соответствовать стоку с гидрохимически однородного участка водосбора. Распределение (6) характеризует участок увеличения антропогенной нагрузки. Распределение (7) определяет неоднородный по гидрохимическим условиям участок. Таким образом, распределения (5) – (7) соответствуют наиболее типичным ситуациям, связанным с поступлением загрязняющих веществ с исследуемых участков водосборов [1, 22].

На рис. 1*а* представлены зависимости (5)–(7). Соответствующие зависимости для полного массового расхода (3) показаны на рис. 1*б*. Шаг интегрирования составил $\Delta z = 0{,}02$. Соответствующее количество точек – 50 (далее нумерация зависимостей будет соответствовать рис. 1). Следует отметить, что данное количество точек отражает возможности реального натурного эксперимента. Прямая задача (1) рассматривалась для значений параметров $\alpha = 10$, $\theta_1 = 1{,}5$. Результаты расчета прямой задачи представлены на рис. 1*в*.

Для анализа обратной задачи необходимо рассмотреть решение уравнения (1) с граничными условиями (4), которое выражается через неизвестную зависимость $\tilde{\Phi}(z)$. Это решение выглядит следующим образом:

$$\theta(z,\alpha) = \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1}\left(\theta_1 + \alpha e^{\alpha}\int_0^1 \tilde{\Phi}(\xi)e^{-\alpha\xi}\,d\xi\right) - \alpha e^{\alpha z}\int_0^z \tilde{\Phi}(\xi)e^{-\alpha\xi}\,d\xi. \tag{8}$$

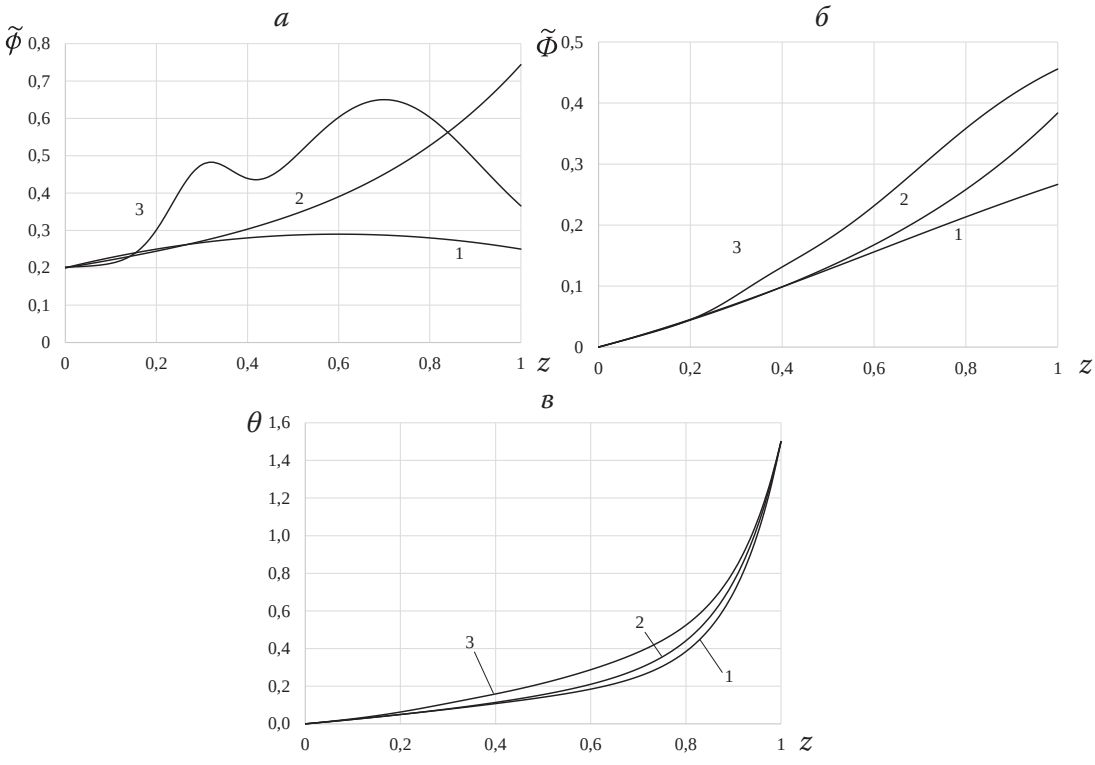


Рис. 1. Распределение значений характерных величин вдоль русла:
а – распределения удельного массового расхода для функций (5) – (7): 1 – функция (5), 2 – функция (6), 3 – функция (7); *б* – соответствующие распределения для полного расхода (3); *в* – распределение концентраций загрязняющих веществ как результат решения прямой задачи (1).

Fig.1. Distribution of characteristic values along the riverbed: *a* – distributions of specific mass flow rate for functions (5) – (7): 1 – function (5), 2 – function (6), 3 – function (7); *b* – corresponding distributions for total flow rate (3); *c* – distribution of pollutant concentrations as a result of solving direct problem (1).

Представим неизвестную функцию в виде полинома:

$$\tilde{\Phi}(\xi) = \sum_{n=1}^{m} a_n \xi^n. \tag{9}$$

Тогда решение (8) представляется в виде разложения по набору функций $H_n(z, \alpha)$:

$$\theta(z) = H_0(z, \alpha) + \sum_{n=1} a_n H_n(z, \alpha), \tag{10}$$

где:

$$H_0 = \theta_1 \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1},$$

$$H_1(z, \alpha) = z - \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1},$$

$$H_2(z, \alpha) = \left[z^2 + \frac{2}{\alpha} z - \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1}\right], \tag{11}$$

$$H_3(z, \alpha) = \left[z^3 + \frac{3z^2}{\alpha} + \frac{6z}{\alpha^2} - \left(1 + \frac{3}{\alpha} + \frac{6}{\alpha^2}\right) \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1}\right].$$

.....

Здесь $H_0(z, \alpha)$ – решение однородного уравнения (1). Набор функций (11) обладает общими свойствами:

$$H_n(0, \alpha) = H_n(1, \alpha) = 0; H_n(z, \alpha) \geq 0; H_n(z, \alpha) \leq M_n(\alpha), \quad (12)$$

где $M_n > 0$ – верхняя граница области значений функций H_n.

Представление (9) позволяет получить аналитические зависимости, что обусловливает наглядность и простоту рассматриваемых разложений (11). Кроме того, такое представление существенно упрощает практическое применение рассматриваемого метода.

Как следует из (11), рассматриваемая функция характеризуется сильной зависимостью от числа Пекле, которое, в свою очередь, зависит от коэффициента продольной дисперсии. Как следствие, использование любого неточного значения коэффициента продольной дисперсии (найденного из косвенных, априорных соображений или расчетов [24–29]) может привести к неверным результатам решения обратной задачи при анализе данных реального натурного эксперимента. Последнее еще раз подчеркивает необходимость определения числа Пекле непосредственно по имеющимся данным (натурным измерениям). Отметим, что при решении обратных задач данного класса (например, [5–13]) число Пекле считается заданным.

Обратная задача. Целью решения обратной задачи являлось определение неизвестного параметра α и коэффициентов a_n полинома (9) для вычисления зависимости $\widetilde{\Phi}(z)$. Здесь следует отметить, что существование, единственность и устойчивость решения обратной задачи для стационарного уравнения (1) строго доказаны в [31]. Параметры модели a_n ($n = 1, 2, ..., m$), входящие в (10), определялись из условия минимизации функционала:

$$S = \sum_{i=1}^{k} (\theta(z_i, \omega) - \theta_i)^2 \underset{\omega}{\rightarrow} min, \quad (13)$$

где $\theta(z_i, \omega)$ – расчетное значение концентрации на основе формулы (10);

θ_i – известное (измеренное) значение концентрации;

ω – вектор параметров ($\alpha, a_1 \ldots a_m$), минимизирующий функционал S.

Суммирование в (13) ведется по числу расчетных точек, число которых равно k. Неизвестные параметры представления (10), (11) определялись с использованием метода глобальной оптимизации [32–34]. Для этих целей использовали пакет прикладных программ MatLab (MathWorks Inc.) с расширением Global Optimization Toolbox [34]. Глобальный минимум выбирался из локальных минимумов, достигнутых на наборе из 100 случайных начальных точек, сгенерированных функцией MultiStart [34]. Для определения локальных минимумов применяли алгоритм нелинейной оптимизации без ограничений Левенберга – Марквардта [35].

На рис. 2 проиллюстрированы результаты использования метода для функции 1 (рис. 1*а*), показаны изолинии сечения поверхности $S(\alpha, \widetilde{\Phi}(1))$, где $\widetilde{\Phi}(1)$ – сумма коэффициентов (9) при $m = 1$.

На рис. 3 показаны восстановленные указанным методом распределения полного массового расхода загрязнителя $\widetilde{\Phi}(z)$ для различных степеней m полинома (9).

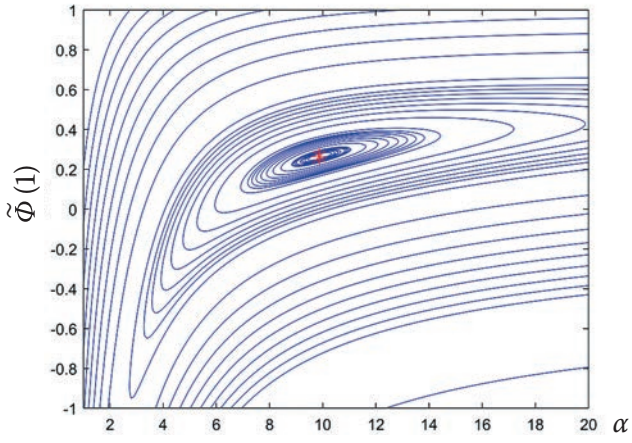


Рис. 2. Изолинии (контуры) функционала (13) в пространстве α, $\tilde{\Phi}(1)$, где $\tilde{\Phi}(1)$ – сумма коэффициентов $a_n(9)$ для функции 1 при $m = 1$. Точка определяет глобальный минимум.
Fig. 2. Isolines (contours) of the functional (13) in the space α, $\tilde{\Phi}(1)$, where $\tilde{\Phi}(1)$ is the sum of the coefficients a_n (9) for function 1 at $m = 1$. The point indicates the global minimum.

Как следует из рис. 3, с ростом степени полинома наблюдается сходимость восстановленных функций к зависимости, определяемой точным решением. В табл. 1 приведены значения искомых параметров для используемых тестовых функций. Из данных табл. 1 следует, что основные параметры рассматриваемой задачи α, $\tilde{\Phi}(1)$ с ростом степени полинома сходятся к точному значению. Таким образом, можно утверждать, что представление (9) применимо для решения обратной задачи и дает вполне корректные результаты.

Таблица 1. Точное решение. Параметры обратной задачи
Table 1: Exact solution. Inverse problem parameters

Функции	Функция 1 Степени полинома			Функция 2 Степени полинома				Функция 3 Степени полинома		
Коэффициенты	1	2	3	1	2	3	4	1	3	6
α	9,88	10,17	10,00	8,75	9,62	9,87	9,97	8,7	10,64	10,12
a_1	0,26	0,23	0,20	0,28	0,17	0,21	0,20	0,41	0,15	0,14
a_2		0,06	0,15		0,17	0,05	0,12		0,46	0,6
a_3			-0,08			0,11	-0,03		-0,103	-0,48
a_4							0,09			0,17
a_5										0,47
a_6										-0,44
$\tilde{\Phi}(1)$ расчетное	0,26	0,28	0,27	0,28	0,34	0,37	0,38	0,41	0,51	0,46
$\tilde{\Phi}(1)$ точное	0,267			0,384				0,456		

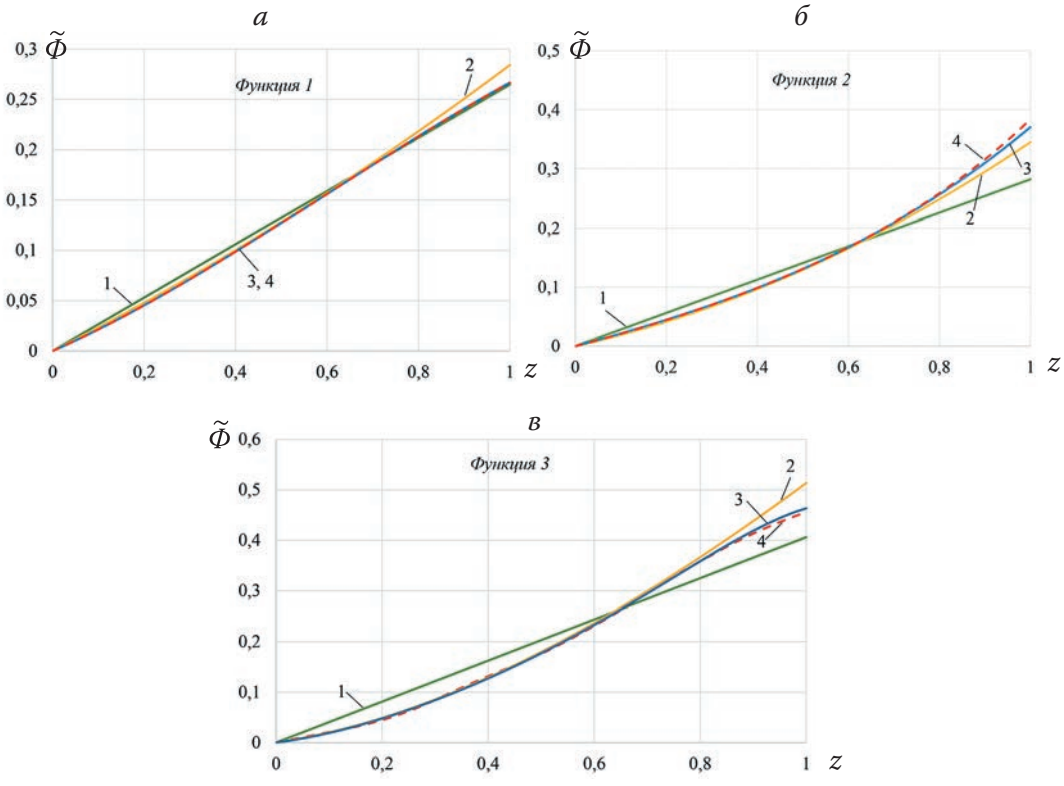


Рис. 3. Распределения полного массового расхода загрязняющих веществ, восстановленные методом оптимизации, при различных степенях полинома *m* (9):
а – функция 1: 1–*m*=1, 2–*m*=2, 3–*m*=3, 4 – точное решение (рис. 1*б*);
б – функция 2: 1–*m*=1, 2–*m*=2, 3–*m*=3, 4 – точное решение;
в – функция 3: 1–*m*=1, 2–*m*=2, 3–*m*=3, 4 – точное решение.
Fig. 3. Distributions of pollutant flow rate reconstructed by the optimization method at various degrees of the polynomial m (9): *a* – function 1: 1–*m*=1, 2–*m*=2, 3–*m*=3, 4 – exact solution (Fig. 1b); *b* – function 2: 1–*m*=1, 2–*m*=2, 3–*m*=3, 4 – exact solution; *c* – function 3: 1–*m*=1, 2–*m*=2, 3–*m*=3, 4 – exact solution.

Однако при решении обратной задачи основные проблемы возникают при наличии случайных отклонений от значений, имитирующих реальные измерения. Как правило, рандомизация осуществляется с использованием нормального закона распределения, а дисперсия распределения определяет величину отклонения [10]. Здесь необходимо иметь в виду, что использование одной сгенерированной реализации случайных значений изучаемой переменной может привести к неверным значениям определяемых параметров.

В этом исследовании предлагается более общий подход, основанный на методе Монте-Карло.

Рандомизация. Метод Монте-Карло

Рандомизация проводилась следующим образом. Для каждой точки θ_i (z_i) точного решения для распределения концентрации (рис. 1*в*) в интервале $\Delta\theta_i = \pm\delta$ с помощью генератора случайных чисел задавалось значение концен-

трации. Применение метода Монте-Карло основывалось на рассмотрении N различных реализаций случайного разброса точек в заданном интервале и вычислении средних значений соответствующих параметров α, α_n [35]. В ходе расчета установлено, что степени полинома выше третьей дают нестабильные и физически нереализуемые значения искомых параметров. Известно, что в случае разложения типа (10) при рандомизации существует оптимальное число членов, выше которого представление функции становится некорректным [36]. Последнее связано с тем, что восстановленная зависимость начинает воспроизводить случайные отклонения, и результаты расчета перестают быть устойчивыми.

Распределения полного массового расхода загрязнителя для $\delta = 0{,}05$, $N = 1\,000$ представлены на рис. 4 *а–в*. В табл. 2 приведены значения искомых параметров для нерандомизированного и рандомизированного распределений концентраций.

Таблица 2. Параметры обратной задачи для нерандомизированного ($\delta = 0$) и рандомизированного ($\delta = 0{,}05$) распределения при $N = 1\,000$
Table 2. Parameters of the inverse problem for non-randomized ($\delta = 0$), and randomized $\delta = 0{,}05$ distributions for $N = 1\,000$

Расчет	Функция 1		Функция 2		Функция 3	
	α	$\widetilde{\Phi}(1)$	α	$\widetilde{\Phi}(1)$	α	$\widetilde{\Phi}(1)$
Точное значение	10	0,267	10	0,384	10	0,456
$\delta = 0$	10,0001	0,267	9,868	0,370	10,642	0,513
$\delta = 0{,}05$	10,108	0,250	10,009	0,340	10,720	0,495

Как следует из данных табл. 2, отклонения параметров, рассчитанных по рандомизированным значениям, от их точных значений не превышают 8 % для функции 3. Для функций 1 и 2 отклонения составляют около 1 %, а отклонения по параметру $\widetilde{\Phi}(1)$ – около 4 %. Отклонения от нерандомизированных значений ($\delta = 0$) не превышают 2 %. Таким образом, полученные результаты можно считать устойчивыми относительно рандомизации в указанном интервале. На рис. 4*г* представлены результаты расчета для функции 3 с учетом рандомизации. Анализ полученных распределений позволяет сделать вывод о том, что отклонения расчетных значений от точных весьма незначительны.

Следует иметь в виду, что величина θ_1 была выбрана произвольно. Вследствие этого необходимо проверить, влияет ли эта величина на параметры обратной задачи. Кроме того, необходимо убедиться, что рассматриваемый метод применим к любым значениям параметра α. На рис. 5 показаны распределения полного массового расхода загрязнителя для различных значений параметра α при $\theta_1 = 1{,}5$. В табл. 3*а* и 3*б* приведены соответствующие значения параметров.

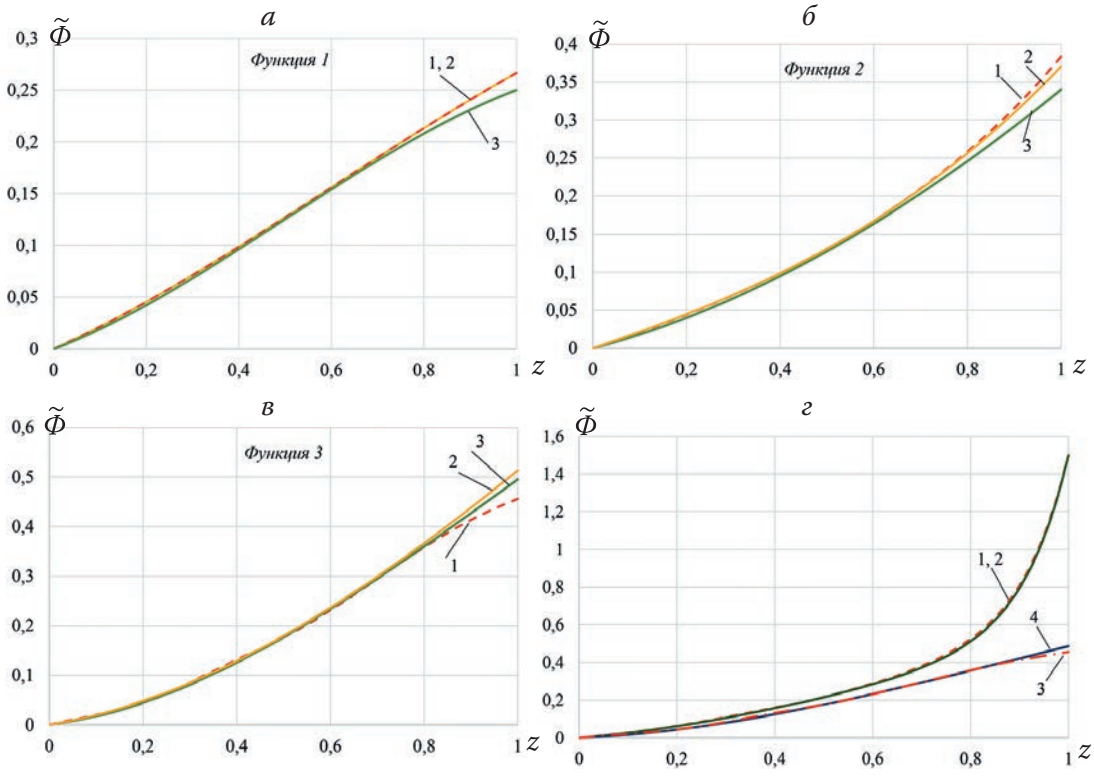


Рис. 4. Распределения полного массового расхода для полиномов третьей степени (*а*–*в*): 1 – точное решение, 2 –полином третьей степени при $\delta = 0$, 3 – полином третьей степени при $\delta = 0{,}05$, $N = 1\,000$ (номера функций указаны на рисунках). Результаты расчета для функции 3 (*г*): 1 – точный расчет для распределения концентрации, 2 –восстановленное распределение концентрации с учетом рандомизации, 3 – точный расчет для распределения полного массового расхода, 4 – восстановленное распределение полного массового расхода с учетом рандомизации.
Fig.4. Distributions of total flow rate for the third degree of polynomials (*a*–*c*): 1 – exact solution, 2 – third degree of polynomial at $\delta = 0$, 3 – third degree of polynomial at $\delta = 0{,}05$, $N = 1\,000$. Final calculation results for function 3 (*d*): 1 – exact calculation for concentration distribution, 2 – reconstructed concentration distribution taking into account randomization, 3 – exact calculation for total mass flow rate distribution, 4 – reconstructed distribution of total mass flow rate taking into account randomization.

Таблица 3*а*. Значения расчетных параметров для функции 3 при $\theta_1 = 1{,}5$, $\delta = 0{,}05$ (точное значение: $\widetilde{\Phi}(1) = 0{,}456$)
Table 3*a*. Values of calculated parameters for function 3 at $\theta_1 = 1{,}5$, $\delta = 0{,}05$ (exact value: $\widetilde{\Phi}(1) = 0{,}456$)

α точное	α вычисленное	$\widetilde{\Phi}(1)$
10	10,788	0,495
20	20,866	0,4801
50	51,724	0,471

Таблица 3*б*. Значения расчетных параметров при различных значениях θ_1 при α = 20, δ = 0,05
Table 3b. Values of calculated parameters at various values of θ_1 at α = 20, δ = 0,05

θ_1 точное	α вычисленное	$\widetilde{\Phi}(1)$
1,5	20,866	0,486
1,2	21,210	0,4856
1	21,679	0,485
0,8	22,769	0,485

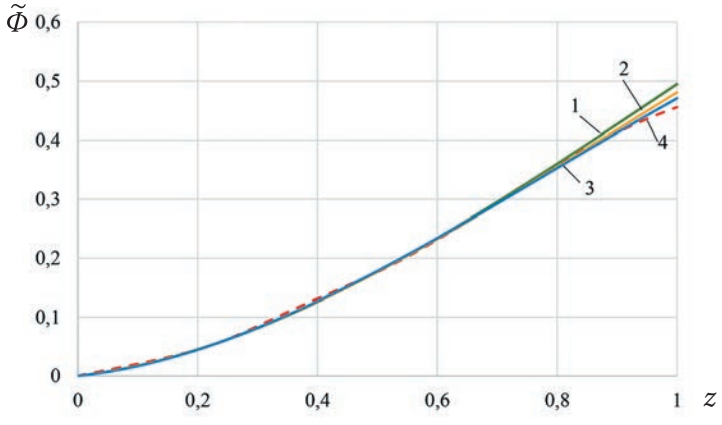


Рис. 5. Распределения полного массового расхода загрязнителя для различных значений параметра α при θ_1 = 1,5 для функции 3: 1–α=10; 2–α=20; 3–α=50; 4 – точное решение.
Fig. 5. Distributions of total mass flow rate for various values of parameter α at θ_1 = 1,5 for function 3 under randomization: 1–α=10; 2–α=20; 3–α=50; 4 – exact solution.

Как следует из полученных результатов, изменение параметра α не приводит к заметному изменению зависимости $\widetilde{\Phi}(z)$, также рассматриваемый метод вполне корректно определяет значения параметра α.

Натурные наблюдения

Для применения предложенного метода к результатам натурных измерений использованы данные [22]. В этой работе исследовалось распределение концентрации загрязняющих веществ в речном бассейне Хоксбери – Непин (Восточная Австралия). Водосбор реки представляет собой урбанизированную территорию, что приводит к сбросу значительных объемов загрязняющих веществ с больших площадей. Как следует из результатов измерений, в речной воде содержится значительное количество тяжелых металлов. Сток с сельскохозяйственных угодий также вносит существенный вклад в загрязнение воды в реке.

На рис. 6 представлены значения измеренных концентраций растворенного кобальта (*Co*) на участке реки длиной 80 км и результаты расчетов. Концентрация *Co* на верхнем створе соответствует значению 0,16 мкг/л. Зависимость характеризуется ускоренным монотонным ростом концентрации *Co*, что сви-

детельствует о наличии постоянно действующего источника диффузного загрязнения. Оптимизацией функционала S (13) определен глобальный минимум для полинома первой степени, достигаемый при значениях параметров: $\alpha = 7{,}3$, $\alpha_1 = 0{,}228$ (рис. 6*б*).

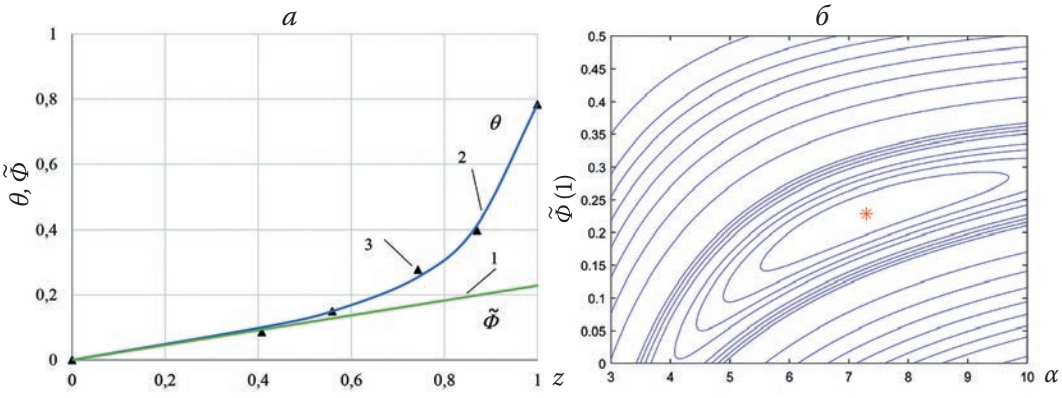


Рис. 6. Распределение концентрации кобальта по результатам натурного эксперимента (треугольники) [22]: *а*) 1 – распределение концентрации, восстановленное предложенным методом; 2 – распределение полного массового расхода; *б*) изолинии функционала $S(13)$ в пространстве α, $\widetilde{\Phi}(1)$ при $m = 1$. Точкой отмечен глобальный минимум, определяющий искомые параметры.
Fig. 6. Distribution of Cobalt concentration for data obtained as a result of a field experiment [22]: *a*) 1 – concentration distribution reconstructed by the global optimization method, 2 – distribution of total mass flow rate; *b*) corresponding counters of the functional $S(13)$ in the space α, $\widetilde{\Phi}(1)$ for $m = 1$. The point indicates the global minimum.

Полученные результаты расчетов можно рассматривать как оценки определяемых параметров. Однако возникает ряд вопросов, связанных, прежде всего, с количеством измерений. А именно: как количество измерений может повлиять на точность расчета по предлагаемой методике? Какое количество измерений необходимо для получения корректных результатов? Вышеперечисленные вопросы требуют дополнительных исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подавляющее большинство исследований, рассматривающих решение обратных задач для уравнения адвекции-диффузии, посвящено восстановлению распределения удельного массового расхода загрязняющих веществ, поступающих в водоток из различных источников. Математически задача решается для заданного значения числа Пекле на основе квазиэксперимента, когда восстанавливается заданное распределение удельного массового расхода загрязняющего вещества. Однако существует ряд проблем, возникающих из-за неустойчивости полученных решений, которые нивелируются известными методами регуляризации [15]. Однако и здесь возникает немало вопросов. Действительно, как следует из рис. 1, особенности поведения тестовых функций для удельного массового расхода плохо отражены в соответствующем распределении концентрации, полученном при решении прямой задачи.

Для восстановления этих особенностей в тестовом эксперименте необходимо большое количество точек. Сложность расчета существенно возрастает при задании случайных отклонений от рассматриваемых распределений.

Между тем, с практической точки зрения существует необходимость оценки полного количества загрязняющих веществ, поступающих в водоток за единицу времени на исследуемом участке. Эта величина – интегральная характеристика, определяющая базовый диффузный сток загрязнителей. В отличие от удельного массового расхода, полный массовый расход является монотонно возрастающей функцией координаты, что облегчает решение обратной задачи.

Целью данного исследования являлось решение задачи определения полного массового расхода загрязняющего вещества и числа Пекле, которое в расчете играет определяющую роль. Для решения задачи рассматривалось стационарное уравнение адвекции-диффузии, выраженное через полный массовый расход в виде (8). Зависимость полного массового расхода от координаты представлялась в виде полинома (9). Метод глобальной оптимизации (13) позволил определить как неизвестные коэффициенты полинома, так и число Пекле, что чрезвычайно важно с практической точки зрения. Для точного решения установлена сходимость искомых параметров α, $\widetilde{\Phi}(1)$ к их заранее заданным значениям с ростом степени полинома, что свидетельствует о корректности примененного метода.

Для анализа рандомизированных значений концентрации загрязняющих веществ использовался метод Монте-Карло, когда значения концентрации задавались случайным образом в пределах определенного интервала. Анализ 1 000 реализаций случайных отклонений позволил выяснить средние значения указанных параметров, которые незначительно отличались от их точных значений. Установлена степень полинома, начиная с которой рандомизация дает нестабильные результаты. Доказано, что расчет распределения полного массового расхода загрязняющего вещества дает устойчивые результаты.

Применение предложенного метода рассмотрено к данным измерений [22]. Метод оптимизации дал возможность определить глобальный минимум функционала S (13) для имеющихся данных по распределению концентрации на основе шести измерений и далее оценить значения искомых параметров. Следует отметить, что результаты расчета обратной задачи существенно зависят от размерности массива используемых данных. Этот вопрос еще мало изучен, однако он является определяющим при применении описанного метода к результатам натурного эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе предложен метод расчета распределения полного массового расхода консервативных загрязняющих веществ на исследуемой водосборной территории. Метод основан на анализе данных о пространственном распределении концентраций загрязнителей, полученных по результатам натурных измерений.

Расчет проводился с использованием трех тестовых функций распределения удельного расхода загрязняющего вещества. Для решения обратной задачи распределение полного массового расхода представлялось в виде полинома. Применение метода глобальной нелинейной оптимизации позволило рассчитать как полный массовый расход для исследуемой области, так и неизвестное значение числа Пекле.

Для исследования влияния случайных отклонений концентрации загрязняющих веществ на значения определяемых параметров применен метод Монте-Карло. Суть метода заключается в их определении на множестве случайных реализаций (значений концентрации, случайным образом распределенных на заданном интервале) и вычислении средних значений.

Применение метода позволило определить степень полинома, выше которой расчет дает неустойчивые результаты. По итогам проведенного анализа установлено, что метод дает устойчивые результаты с незначительным отклонением параметров от их точных значений, определенных путем решения прямой задачи. Рассмотрено применение метода к результатам натурных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lintern A., Webb J.A., Ryu D., Liu S., Bende-Michl U., Waters D., Leahy P., Wilson P., Western A.W. Key factors influencing differences in stream water quality across space. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 2018. Vol. 5 (1), e1260. https://doi.org/10.1002/wat2.1260.
2. Chen Y., Lin L.S., Viadero R.C., Gang D.D. Nonpoint Source Pollution // Water Environment Research. 2007. Vol. 79 (10). P. 2032–2048. https://doi.org/10.2175/106143007X218656.
3. Narendran N.A. A review on environmental problem due to water pollution // International Journal of Scientific Engineering and Research. 2015. Vol. 3 (4). P. 2014–2016.
4. Фащевская Т.Б., Полянин В.О., Кирпичникова Н.В., Мотовилов Ю.Г., Алгушаева А.В. Современные проблемы гидрохимии. М.: ИВП РАН, 2020. 105 с.
5. Shen J., Jia J.J., Sisson G. Inverse estimation of nonpoint sources of fecal coliform for establishing allowable load for Wye River Maryland // Water research. 2006. Vol. 40 (18). P. 3333–3342. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.035.
6. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach // Water Resources Research. 2005. Vol. 41 (7). P. 1–13. https://doi.org/10.1029/2004wr003754.
7. Permanoon E., Mazaheri M., Amiri S. An analytical solution for the advection-dispersion equation inversely in time for pollution source identification // Physics and Chemistry of the Earth. 2022. Vol. 128 (2). 103255. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103255.
8. Rashedi K. A numerical solution of an inverse diffusion problem based on operational matrices of orthonormal polynomials // Mathematical Methods in the Applied Sciences. 2021. Vol. 44 (17). P. 12980–12997. https://doi.org/10.1002/mma.7601.
9. De Sousa D.M., Roberty N.C. An inverse source problem for the stationary diffusion-advection decay equation // Inverse Problems in Science and Engineering. 2012. Vol. 20 (7). P. 891–915. https://doi.org/10.1080/17415977.2011.609466.
10. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data // Inverse Problems in Science and Engineering. 2017. Vol. 25 (2). P. 279–308. https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396.
11. Jun K.S., Kang J.W., Lee K.S. Simultaneous estimation of model parameters and diffuse pollution sources for river water quality modeling // Water Science and Technology. 2007. Vol. 56 (1). P. 155–162. https://doi.org/10.2166/wst.2007.447.

12. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations // Journal of Computational Physics. 2002. Vol. 470. 111609. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111609.
13. Lukyanenko D.V., Shishlenin M.A., Volkov V.T., Solving of the coefficient inverse problems for a nonlinear singularly perturbed reaction-diffusion-advection equation with the final time data // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2018. Vol. 54. P. 233–247. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.06.002.
14. Yasinskii S.V., Vishnevskaya I.A., Venitsianov E.V. Diffuse pollution of water bodies and estimation of export of biogenic elements under different scenarios of water use in the watershed // Water Resources. 2019. Vol. 46 (2). P. 266–277. https://doi.org/10.31857/S0321-0596462232-244.
15. Filimonov V.Y., Lovtskaya O.V. Zinoviev A.T. Diffuse pollution on small rivers. Features of distribution of dissolved pollutant concentrations // Eurasian journal of mathematical and computer applications. 2021. Vol. 9 (3). P. 39–52. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2021-9-3-39-52.
16. Liu Q., Cheng Y., Fan C. Pollution characteristics and health exposure risks of heavy metals in river water affected by human activities // Sustainability. 2023. Vol. 15 (10). 8389. https://doi.org/10.3390/su15108389.
17. Chueh Y.-Y., Fan C., Huang Y.-Z. Copper concentration simulation in a river by SWATWASP integration and its application to assessing the impacts of climate change and various remediation strategies // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 279. 111613. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111613.
18. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows. Environmental Science & Technology. 2020. Vol. 54 (24). P. 15742–15750. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016
19. Ren J, Hao J, Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China // Environmental science and pollution research. 2021. Vol. 28. P. 2904–2913. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3.
20. Hoang H.G., Lin C., Tran H., Chiang C.F., Bui X.T., Cheruiyot N.K., Shern C.C., Lee C.W., Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region // Environmental Technology & Innovation. 2020. Vol. 20. 101043. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101043.
21. Lu Q., Bian Z., Tsuchiya N. Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in river water and sediments in a historically metal mined watershed, Northeast Japan // Environmental monitoring and assessment. 2021. Vol. 193 (12). 814. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09601-1.
22. Markich S.J., Brown P.L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury Nepean River, south-eastern Australia // Science of the total environment. 1998. Vol 217 (3). P. 201–230. https://doi.org/10.1016/s0048-9697(98)00188-0.
23. Miller P.D. Applied asymptotic analysis, Providence, Rhode Island // American Mathematical Society. 2006. Vol. 75. https://doi.org/10.1090/gsm/075.
24. Kashefipoura S.M., Falconer R.A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels // Water Research. 2002. Vol. 36 (6). P. 1596–1608. https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00351-7.
25. Tayfur G., Singh V.P., Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial neural network // Journal of Hydraulic Engineering. 2005. Vol. 131 (11). P. 991–1000. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:11(991).
26. Pannone M., Mirauda D., Vincenzo A.D., Molino B. Longitudinal dispersion in straight open channels: Anomalous breakthrough curves and first-order analytical solution for the depthaveraged concentration // Water. 2018. Vol. 10 (4). 478. https://doi.org/10.3390/w10040478.
27. Pannone M. Longitudinal Dispersion in River Flows Characterized by Random Large-Scale Bed Irregularities: First-Order Analytical Solution // Journal of Hydraulic Engineering. 2012. Vol. 138 (5). P. 400–411. https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000537.
28. Goliatt L., Sulaiman S.O., Khedher K.M., Farooqueean A.A., Yaseen Z.M. Estimation of natural streams longitudinal dispersion coefficient using hybrid evolutionary machine learning model // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2021. Vol. 15 (1). P. 1298–1320. https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1972043.

29. Gualtieri C., Ciaravino G., Doria G.P. Analysis of longitudinal dispersion equations in streams and rivers // Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia / USA September 10–13, 2006 (ICHE 2006), Philadelphia, USA.
30. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plaint rivers // Eurasian journal of mathematical and computer applications. 2023. Vol. 11 (4). P. 14–28. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28.
31. Алексеев Г.В., Вахитов И.С., Соболева О.В. Оценки устойчивости в задачах идентификации для уравнения конвекции диффузии-реакции // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2012. 52(12). С. 2190–2205.
32. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. New York: Springer, 2006. 651 p.
33. Dennis J.E., Jr., Schnabel R.B., Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations. New York: SIAM Publ., 1987. 395 p.
34. Global Optimization Toolbox. User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020. 877 p.
35. Strijov V., Weber G.W., Nonlinear regression model generation using hyperparameter optimization // Computers & Mathematics with Applications. 2010. Vol. 60 (4). P. 981–988. https://doi.org/ 10.1016/j.camwa.2010.03.021.
36. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. New York: Wiley, 1998. 736 p.

REFERENCES

1. Lintern A., Webb J.A., Ryu D., Liu S., Bende-Michl U., Waters D., Leahy P., Wilson P., Western A.W. Key factors influencing differences in stream water quality across space. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water.* 2018. Vol. 5 (1), e1260. https://doi.org/ 10.1002/wat2.1260.
2. Chen Y., Lin L.S., Viadero R.C., Gang D.D. Nonpoint Source Pollution. *Water Environment Research.* 2007. Vol. 79 (10). P. 2032–2048. https://doi.org/10.2175/106143007X218656.
3. Narendran N.A. A review on environmental problem due to water pollution. *International Journal of Scientific Engineering and Research.* 2015. Vol. 3 (4). P. 2014–2016.
4. Fashchevskaya T.B., Polyanin V.O., Kirpichnikova N.V., Motovilov Yu.G., Algushaeva A.V. Modern problems of hydrochemistry. IWP, Moscow, 2020. 105 p. (In Russ.).
5. Shen J., Jia J.J., Sisson G. Inverse estimation of nonpoint sources of fecal coliform for establishing allowable load for Wye River Maryland. *Water research.* 2006. Vol. 40 (18). P. 3333–3342. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.035.
6. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach. *Water Resources Research.* 2005. Vol. 41 (7). P. 1–13. https://doi.org/10.1029/2004wr003754.
7. Permanoon E., Mazaheri M., Amiri S. An analytical solution for the advection-dispersion equation inversely in time for pollution source identification. *Physics and Chemistry of the Earth.* 2022. Vol. 128 (2). 103255. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103255.
8. Rashedi K. A numerical solution of an inverse diffusion problem based on operational matrices of orthonormal polynomials. *Mathematical Methods in the Applied Sciences.* 2021. Vol. 44 (17). P. 12980–12997. https://doi.org/10.1002/mma.7601.
9. De Sousa D.M., Roberty N.C. An inverse source problem for the stationary diffusion-advection decay equation. *Inverse Problems in Science and Engineering.* 2012. Vol. 20 (7). P. 891–915. https://doi.org/10.1080/17415977.2011.609466.
10. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data. *Inverse Problems in Science and Engineering.* 2017. Vol. 25 (2). P. 279–308. https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396.
11. Jun K.S., Kang J.W., Lee K.S. Simultaneous estimation of model parameters and diffuse pollution sources for river water quality modeling. *Water Science and Technology.* 2007. Vol. 56 (1). P. 155–162. https://doi.org/10.2166/wst.2007.447.
12. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations. *Journal of Computational Physics.* 2002. Vol. 470. 111609. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111609.
13. Lukyanenko D.V., Shishlenin M.A., Volkov V.T., Solving of the coefficient inverse problems for a nonlinear singularly perturbed reaction-diffusion-advection equation with the final time data.

Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2018. Vol. 54. P. 233–247. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.06.002.
14. Yasinskii S.V., Vishnevskaya I.A., Venitsianov E.V. Diffuse pollution of water bodies and estimation of export of biogenic elements under different scenarios of water use in the watershed. 2019. *Water Resources.* 2019. Vol. 46 (2). P. 266–277. https://doi.org/10.31857/S0321-0596462232-244.
15. Filimonov V.Y., Lovtskaya O.V. Zinoviev A.T. Diffuse pollution on small rivers. Features of distribution of dissolved pollutant concentrations. *Eurasian journal of mathematical and computer applications.* 2021. Vol. 9 (3). P. 39–52. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2021-9-3-39-52.
16. Liu Q., Cheng Y., Fan C. Pollution characteristics and health exposure risks of heavy metals in river water affected by human activities. *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (10). 8389. https://doi.org/10.3390/su15108389.
17. ChuehY.-Y., Fan C., Huang Y.-Z. Copper concentration simulation in a river by SWAT-WASP integration and its application to assessing the impacts of climate change and various remediation strategies. *Journal of Environmental Management.* 2021. Vol. 279. 111613. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111613.
18. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows. *Environmental Science & Technology.* 2020. Vol. 54 (24). P. 15742–15750. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016
19. Ren J, Hao J, Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China. *Environmental science and pollution research.* 2021. Vol. 28. P. 2904–2913. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3.
20. Hoang H.G., Lin C., Tran H., Chiang C.F., Bui X.T., Cheruiyot N.K., Shern C.C., Lee C.W., Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region. *Environmental Technology & Innovation.* 2020. Vol. 20. 101043. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101043.
21. Lu Q., Bian Z., Tsuchiya N. Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in river water and sediments in a historically metal mined watershed, Northeast Japan. *Environmental monitoring and assessment.* 2021. Vol. 193 (12). 814. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09601-1.
22. Markich S.J., Brown P.L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury Nepean River, south-eastern Australia. *Science of the total environment.* 1998. Vol 217 (3). P. 201–230. https://doi.org/10.1016/s0048-9697(98)00188-0.
23. Miller P.D. Applied asymptotic analysis, Providence, Rhode Island. *American Mathematical Society.* 2006. Vol. 75. https://doi.org/10.1090/gsm/075.
24. Kashefipoura S.M., Falconer R.A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. *Water Research.* 2002. Vol. 36 (6). P. 1596–1608. https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00351-7.
25. Tayfur G., Singh V.P., Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial neural network. *Journal of Hydraulic Engineering.* 2005. Vol. 131 (11). P. 991–1000. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:11(991).
26. Pannone M., Mirauda D., Vincenzo A.D., Molino B. Longitudinal dispersion in straight open channels: Anomalous breakthrough curves and first-order analytical solution for the depth/averaged concentration. *Water*. 2018. Vol. 10 (4). 478. https://doi.org/10.3390/w10040478.
27. Pannone M. Longitudinal Dispersion in River Flows Characterized by Random Large-Scale Bed Irregularities: First-Order Analytical Solution. *Journal of Hydraulic Engineering.* 2012. Vol. 138 (5). P. 400–411. https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000537.
28. Goliatt L., Sulaiman S.O., Khedher K.M., Farooqueean A.A., Yaseen Z.M. Estimation of natural streams longitudinal dispersion coefficient using hybrid evolutionary machine learning model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics.* 2021. Vol. 15 (1). P. 1298–1320. https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1972043.
29. Gualtieri C., Ciaravino G., Doria G.P. Analysis of longitudinal dispersion equations in streams and rivers. *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia,* USA September 10–13, 2006 (ICHE 2006), Philadelphia, USA.
30. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plaint riv-

ers. *Eurasian journal of mathematical and computer applications.* 2023. Vol. 11 (4). P. 14–28. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28.
31. Alekseev G.V., Vakhitov I.S., Soboleva O.V., Stability estimates in identification problems for the convection-diffusion-reaction equation. *Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 2012. Vol. 52 (12). P. 1635–1649. https://doi.org/10.1134/S0965542512120032 (In Russ.).
32. Nocedal J., Wright S.J., *Numerical Optimization.* Springer, New York, 2006. 651 p.
33. Dennis J.E., Jr., Schnabel R.B., Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations. SIAM Publ., New York, 1987. 395 p.
34. *Global Optimization Toolbox. User's Guide.* The MathWorks, Inc., 2020. 877 p.
35. Strijov V., Weber G.W., Nonlinear regression model generation using hyperparameter optimization. *Computers & Mathematics with Applications.* 2010. Vol. 60 (4). P. 981–988. https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.03.021.
36. Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis.* Wiley, New York, 1998. 736 p.

Сведения об авторах:

Филимонов Валерий Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0003-0229-7058; e-mail: vyfilimonov@rambler.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна, старший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350; e-mail: lov@iwep.ru

About the authors:

Valery Y. Filimonov, Doctor of Physical/Mathematical Sciences, Chief Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS), 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Altai Krai, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-0229-7058; e-mail: vyfilimonov@rambler.ru

Olga V. Lovtskaya, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS), 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350, e-mail: lov@iwep.ru

Поступила в редакцию / Received 25.10.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 04.11.2024.
Принята к публикации / Accepted 27.01.2025.

УДК 556.048, 627.81 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-24-39*

О функции распределения наполнений и сбросов при расчетах регулирования стока методом стохастического динамического программирования

М.В. Болгов[1,2]

bolgovmv@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье проанализирована проблема управления водными ресурсами в условиях нарушения стационарности временных рядов стока. Предложено рассматривать нарушенные гидрологические ряды в виде набора условно-стационарных периодов. Поиск оптимального управления для каждого периода осуществляется методом стохастического динамического программирования. **Методы.** Для получения функции распределения наполнений и сбросов предложен итерационный алгоритм решения системы уравнений, связывающих искомые вероятности для всех расчетных интервалов. **Результаты.** Метод реализован на примере управления водными ресурсами Цимлянского водохранилища и позволяет рассчитывать характеристики отдачи водохранилища при задаваемых сценарным образом значениях параметров притока для будущих климатических ситуаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: регулирование стока, оптимизация, динамическое стохастическое программирование, условные распределения, итерационные методы, распределение отдачи, нестационарные ряды.

Финансирование: Результаты в области условных распределений стока получены частично в рамках темы № FMWZ-2022-0001 государственного задания Института водных проблем Российской академии наук.

Для цитирования: Болгов М.В. О функции распределения наполнений и сбросов при расчетах регулирования стока методом стохастического динамического программирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 24–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-24-39, EDN: DHBBEB

On the function of fillings and discharges distribution in calculations of flow regulation by stochastic dynamic programming

Mikhail V. Bolgov[1,2]

bolgovmv@mail.ru

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

© Болгов М.В., 2025

ABSTRACT

Relevance. The problem of water resources management in conditions of disruption of the stationary time series of runoff is considered. It is proposed to consider the disturbed hydrological series as a set of conditionally stationary periods. The search for optimal control for each period is carried out by stochastic dynamic programming. **Methods.** To obtain the distribution function of fillings and discharges, an iterative algorithm is proposed for solving a system of equations linking the desired probabilities for all calculated intervals. **Results.** The method is implemented using the example of the Tsimlyansk reservoir, and allows us to calculate the characteristics of the reservoir's output at scenario-defined values of inflow parameters for future climatic situations.

KEYWORDS: Flow control, optimization, dynamic stochastic programming, conditional distributions, iterative methods, distribution of fillings and discharges, non-stationary series.

Financing: The results in the field of conditional distributions of runoff were obtained partially within the framework of the state assignment of the IWP RAS No. FMWZ-2022-0001.

For citation: Bolgov M.V. On the function of fillings and discharges distribution in calculations of flow regulation by stochastic dynamic programming. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 1. P. 24–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-24-39, EDN: DHBBEB

ВВЕДЕНИЕ

Известные в отечественной гидрологической практике методы управления водными ресурсами (методы регулирования стока) разрабатывались в течение многих десятилетий и основываются на различных принципах и подходах. Наиболее широко применяются методы управления, основанные на принципе диспетчеризации, а при проектировании водохозяйственных установок используется календарный метод оценки гарантированной отдачи в различных диапазонах диспетчерского графика. При этом в качестве последовательностей притока используются наблюденные календарные временные ряды, либо искусственные ряды большой продолжительности, полученные на основе стохастических моделей многолетней и сезонной изменчивости стока.

В последние годы в работах А.В. Лотова, А.Л. Бубера и других авторов [1–3] предлагаются алгоритмы многокритериального поиска оптимального решения с использованием специальных методов поиска так называемых недоминируемых решений, однако в основе этих подходов лежит представление о тех же диспетчерских правилах, которые можно заметным образом улучшить при применении предлагаемых оптимизационных алгоритмов.

Имитационный подход позволяет получать неограниченное число вариантов, обработка которых дает решение практической конкретной задачи с заданной точностью, но при этом сложно учесть вероятностные представления о гидрологических прогнозах, о неопределенности последствий климатических изменений для водных ресурсов, экономические аргументы (критерии), влияющие на принятие управленческих решений.

Следует отметить, что аналитические методы решения задач регулирования стока, позволяющие получать результат в виде законов распределения отдачи, которые можно далее использовать при принятии решений, рассма-

тривались в ряде публикаций, начиная с пионерных работ С.Н. Крицкого, М.Ф. Менкеля, А.Д. Саваренского, П. Морана [4–6], но в основном это были попытки применения систем интегральных уравнений, которые, по причине громоздкости и сложности, не нашли широкого применения в практике регулирования стока [7, 8].

В то же время в международной и российской практике, начиная с 1960-х годов, развивались методы, основанные на решении задачи поиска оптимального, в смысле задаваемого критерия, решения. Можно отметить цикл работ, выполненных в советское время Е.В. Цветковым [9], С.Б. Елаховским [10], А.Л. Великановым [11] и другими исследователями. Обзор основных идей оптимизационного управления представлен в статьях Д.П. Лаукса (D.P. Loucks) [12], Н.А. Картвелишвили [7], Е.В. Цветкова [9].

Задачи оптимального управления водными ресурсами методами динамического программирования обсуждалась рядом авторов, но в данной статье рассматривается более подробно проблема учета вероятностного характера гидрологических данных при поиске оптимальных решений. Основная сложность, помимо выбора оптимизационного подхода, состоит в обосновании вероятностной модели сезонных и многолетних колебаний стока, которую можно использовать для учета неопределенности гидрологических прогнозов.

Обоснование вероятностной модели колебаний стока на период эксплуатации водохозяйственной установки может исходить либо из анализа имеющихся данных наблюдений и пролонгирования выявленных свойств на не очень отдаленное будущее, либо основываться на результатах моделирования глобальных систем взаимодействия суши, атмосферы и океана (модели земной системы). По поводу второго подхода можно отметить следующее. Возможности современных моделей земной системы ограничены, результаты носят сценарный характер и характеризуются значительным «межмодельным» разбросом. Получаемые модельные оценки характеризуют режимы, средние за достаточно продолжительный период времени. Сегодня мы можем говорить лишь о возможности получения статистических характеристик прогнозируемых процессов на период от 20 лет и более.

При пролонгировании стоковых характеристик на основе выявленных свойств имеющихся временных рядов также возникает проблема принятия гипотезы относительно характера будущих колебаний. В ряде работ рассматривается полумарковская модель многолетних колебаний стоковых характеристик, предполагающая скачкообразный переход из одного установившегося состояния гидрологической системы в другое, новое. Идея полумарковского подхода заключается в том, что зависимость между этими состояниями существует только для смежных событий (состояний системы), т. е. модель перехода из одного состояния в другое является марковской.

В обоих случаях возникает задача управления водохозяйственной системой в условиях значительной неопределенности прогнозов будущего гидрологического режима. В процессе решения задачи регулирования стока при каждом переходе от одного расчетного интервала к другому (декада, месяц,

сезон, год) мы не можем допускать переход из одного состояния в другое всей климатической системы на каждом расчетном шаге. Средняя продолжительность условно однородного периода составляет десятки лет, поэтому водохозяйственный расчет должен исходить из того, что режим стока на этот период будет неизменным (однородным). Должна быть каким-то образом задана вероятность пребывания гидролого-климатической системы в каждом из рассматриваемых состояний, и эта вероятность может быть интерпретирована как вероятность соответствующего результата водохозяйственного расчета, представленного в вероятностной форме, например в виде закона распределения наполнения водохранилища в лимитирующий интервал времени.

В качестве вероятностей рассматриваемых сценариев может быть использовано равномерное распределение всех возможных исходов [13] или байесовское правдоподобие, оцениваемое по результатам воспроизведения моделями климатических характеристик в имеющийся период наблюдений [14].

Основная идея предлагаемого подхода заключается в использовании метода динамического стохастического программирования для выработки оптимальных правил управления для каждого из условно-стационарных периодов или сценариев климатических изменений. Цель проведенного исследования – получение функций распределения отдачи при наличии климатически обусловленных изменений стока.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика стохастического динамического программирования

Применяемый в работе метод расчета режимов управления водохозяйственными системами известен в отечественной и зарубежной гидрологической практике на протяжении нескольких десятилетий, но не потерял своей актуальности. В многочисленных современных публикациях по проблемам водного хозяйства обсуждаются и используются различные модификации метода динамического программирования [15–21].

Рассмотрим, следуя работе Д.П. Лаукса с соавторами [12], подход к решению задачи оптимального управления водохранилищем на основе принципа стохастического динамического программирования (СДП). В качестве примера выполним расчеты для Цимлянского гидроузла на р. Дон.

Гидрологический режим р. Дон, особенно в ее нижнем течении, характеризуется нарушениями однородности, связанными во многом с происходящим потеплением климата. В бассейне Дона существенны изменения и половодного, и меженного стока. Измененный гидрологический режим усложняет разработку методов гидрологического прогнозирования, определения расчетных гидрологических характеристик. Требуется создание новых подходов к управлению водохозяйственными системами, учитывающих нестационарность климатических условий.

Установлено, что практически все ряды максимальных срочных расходов воды в бассейне Дона неоднородны и по среднему значению (критерий Стьюдента), и по дисперсии (критерий Фишера), что свидетельствует о нарушении

стационарности рядов максимального стока во всем регионе. Основные изменения в рядах наблюдений максимальных расходов воды произошли в 1971 и 1980 годах. В результате анализа на стационарность рядов минимального стока за зимнюю межень и за летне-осеннюю межень выявлено, что все рассмотренные ряды нестационарны. В рамках многочисленных исследований сделан вывод о нарушении стационарности в рядах гидрологических характеристик и в целом о состоявшейся смене гидрологического режима в бассейне Дона. Очевидна необходимость применения новых методов водохозяйственного расчета, к рассмотрению которых обратимся в данной статье.

Пусть Q_t – случайный приток к водохранилищу с полезным объемом k для интервала времени t внутри года. Будем считать, что распределение вероятностей притока известно. Обозначения S_t и R_t используем для случайного начального объема воды в водохранилище и сброса (попуска) в каждый период t. Распределение вероятностей этих величин неизвестно, и, в частности, зависит от стратегии управления водохранилищем. Поиск этих распределений и представляет собой решение рассматриваемой задачи.

Стратегия оптимального управления заключается в определении некоторой функции от начального объема и ожидаемого притока в каждом периоде. Решение задачи осуществляется для дискретного набора возможных значений притока Q_i и наполнений S_t водохранилища в момент времени t. Тогда PQ_{it} обозначает вероятность притока i в интервале времени t (Q_{it}). Значения PQ_{it} задаются на основе обработки имеющихся данных наблюдений за стоком реки.

Диапазон изменения начального наполнения водохранилища в момент времени t обозначим индексом k. В случае управления в конкретный момент времени t значение $S_{кт}$ известно, но распределение вероятностей PS_{kt} неизвестно, поскольку вероятность наполнения $S_{кт}$ является функцией неизвестной стратегии уравнения. Задав индексы i и k для величин притока и наполнения в момент времени t, индексы j и l используем для значений притока и наполнения в момент времени $t + 1$. Задав начальную емкость $S_{кт}$, приток Q_{it} и конечное наполнение S_{t+1} в интервале времени t, попуск из водохранилища определяем следующим уравнением баланса:

$$R_{kilt} = S_{kt} + Q_{it} - E_{klt} - S_{l,t+1}, \quad (1)$$

где E_{klt} обозначает суммарные потери на испарение и фильтрацию при начальном наполнении k и конечном наполнении l в период времени t.

Пусть PR_{kilt} – неизвестное распределение вероятностей попуска R_{kilt}. Эта вероятность равна вероятности того, что в начальный момент времени наполнение $S_{кт}$, приток – Q_{it} и окончательное наполнение в расчетном периоде t будет $S_{l,t+1}$. Это же значение будет начальным для интервала (периода) $t + 1$.

Согласно [12], для каждого $S_{кт}$ и Q_{it} в каждом периоде t при использовании оптимизационного подхода существует единственное значение $S_{l,t+1}$, которое будет оптимальным. В таком случае совместные все вероятности PR_{kilt} будут равны нулю, кроме одного значения, соответствующего конечному оптимальному значению объема $S_{l,t+1}$ для каждой комбинации $S_{кт}$, Q_{it} и t. Это означает, что условная вероятность $S_{l,t+1}$, при заданных S_{ki} и Q_{it} , которая равна [12]

$$P_r\,[l \mid k, i, t] = \frac{PR_{kilt}}{\sum_l PR_{kilt}}, \tag{2}$$

будет равна нулю для неоптимальных конечных наполнений $S_{l,t+1}$ и равна единице для оптимального $S_{l,t+1}$, задаваемого начальной емкостью $S_{кt}$ и притоком Q_{it} в расчетном интервале t.

Стохастическое динамическое программирование. Модель управления

Для каждого периода времени t оптимальный попуск из водохранилища Rkilt или, что эквивалентно, конечный объем $S_{l,t+1}$, зависят от двух переменных: начального объема $S_{кt}$ и притока в текущий момент времени Q_{it} . Стохастическим характером потерь пренебрегаем. Цель управления состоит в максимизации некоторого системного дохода B_{kilt}, который связан с начальным наполнением водохранилища $S_{кt}$, притоком Q_{it} , сбросом (попуском) R_{kilt} и конечным объемом $S_{l,k+1}$.

Для организации оптимального управления, в соответствии с рекомендациями [12], рассмотрим рекурсивный алгоритм динамического программирования «ходом назад». Предположим, что управление водохранилищем заканчивается в конце интервала $t = T$ некоторого года в будущем. Определим функцию $f_t^n = (k, i)$ как суммарное ожидаемое значение системного дохода для n периодов, включая текущий период t, для которого заданы начальная емкость и приток Q_{it}. Тогда, если имеется один оставшийся период, запишем:

$$f_T^1(k, i) = \max_l(B_{kilt}) \tag{3}$$

для всех k, i, а в l должно быть возможным (реализуемым) для k, i, t.

Для двух периодов, остающихся до конца периода управления водохранилищем, имеем:

$$f_{T-1}^2(k, i) = \max_l\left(B_{k,i,l,T-1} + \sum_j P_{i,j}^{T-1} \cdot f_T^1(l, j)\right) \tag{4}$$

для всех k, i и возможного l.

Здесь $P_{i,j}^{T-1}$ – есть условная вероятность притока $Q_{j,T}$ в период T, при значении притока в период T–1, равном $Q_{i,T-1}$.

Функция $f_{T-1}^2(k, i)$ определяет ожидаемый доход в конце двух периодов при условии, что приток в период T неизвестен точно в период T–1. Вероятность значения стока $Q_{i,T}$ в период T зависит от стока $Q_{i,T-1}$ в период T–1 и определяется условной вероятностью $P_{i,j}^{T-1}$. Напомним, что $f_T^1(k, i)$ в уравнении (3) есть функция начального объема $S_{кt}$ и притока Q_{iT} в период T. Во временном периоде T–1 эти же самые объемы для последующего периода T обозначаются индексами l и j соответственно.

Рекурсивное соотношение, определенное формулой (4), можно обобщить:

$$f_i^n(k, i) = \max_l\left(B_{kilt} + \sum_j P_{ij}^t \cdot f_{t+1}^{n-1}(l, j)\right), \tag{5}$$

где t означает период внутри года;

n – общее число периодов, остающееся до завершения управления водохранилищем.

При поиске оптимального управления системный доход B определим как минимум квадрата отклонения сброса (попуска) в каждый расчетный момент времени от его проектного значения.

Условные законы распределения

Для выполнения расчетов по рассмотренной схеме стохастического динамического программирования необходимо задать условные распределения притока на каждом шаге оптимизационных расчетов. Для рек снегового питания анализ формы условных распределений выполнен в работе [22] в рамках общей проблемы стохастического моделирования гидрологических процессов с сезонным ходом. В соответствии с принятым в этой работе подходом к построению двумерных законов распределения, вычислим условные плотности распределения величин притока к водохранилищу y в каждый момент времени t, если известно значение стока x в предыдущий момент времени $t-1$.

Двумерный закон распределения величин x и y с заданными маргинальными распределениями $p(x)$ и $p(y)$ в случае стационарного марковского процесса представим билинейным разложением [23]:

$$p(t, x, y) = p(x)\, p(y) \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\lambda_k t} \phi_k(x) \phi_k(y)\right], \tag{6}$$

где t – интервал времени между значениями x и y;

$0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \ldots$ – монотонная числовая последовательность;

$\phi_k(x)$ – ортонормированная с весом $p(x)$ система функций.

Важным для дальнейших построений в данной работе является равномерное распределение вероятностей. Построив двумерный закон распределения для равномерно-распределенных случайных величин (для обеспеченностей), путем замены переменной можем получить двумерную плотность для практически любого закона распределения, используемого в гидрологии. В этом случае функции $\phi_k(x)$ – полиномы Лежандра $P_k(x)$.

Рассмотрим, следуя работе И.О. Сарманова [24], переход от корреляции равномерно-распределенных случайных величин к корреляции с заданными маргинальными распределениями в отрезке (a, b). Пусть $f(u, v)$ – двумерная плотность для системы равномерно-распределенных в [0, 1] случайных зависимых величин ξ_1, η_1. Рассмотрим случайные величины ξ, η, задаваемые равенствами:

$$\xi_1 = \int_{\alpha}^{\xi} p(x)dx = F(\xi),\ \eta_1 = \int_{\alpha}^{\eta} p(y)dy = F(y), \tag{7}$$

где $p(x) > 0$ – заданная плотность распределения в отрезке (a, b).

Задача заключается в вычислении двумерной плотности распределения ξ и η по заданной совместной плотности .

Поскольку $F(\xi)$ и $F(\eta)$ – строго монотонные функции, то существуют обратные функции $F^{-1}(\xi)$ и $F^{-1}(\eta)$ и, следовательно, необходимо изучить совместный закон распределения величин $\xi = F^{-1}(\xi_1)$; $\eta = F^{-1}(\eta_1)$.

Плотность совместного распределения ξ и η, обозначаемая ниже $f_1(x, y)$, в соответствии с правилом замены переменного в двукратном интеграле, записывается в виде [24]:

$$f_1(x, y) = p(x)\, p(y)\, f[F(x), F(y)]. \quad (8)$$

Представим плотность $f(u, v)$ билинейным разложением по полиномам Лежандра, нормированным с весом единица. В таком случае плотность $f_1(x, y)$ определяется в виде билинейного разложения:

$$f_1(x, y) = \left\{1 + \sum_{k-1}^{\infty} \lambda^k P_k [F(x)] P_k [F(y)]\right\}, \quad (9)$$

где λ – коэффициент корреляции между $F(\xi)$ и $F(\eta)$;

$P_k(\,)$ – k-й полином Лежандра.

Сворачивая ряд (9), плотность совместного распределения записываем в виде:

$$f_1(x,y) = \frac{p(x)p(y)}{\pi} \times \int_0^{\pi} \frac{(1-\lambda^2)d\omega}{\left\{1-2\lambda\left[(2F(x)-1)(2F(y)-1)+4\sqrt{(F(x)-F^2(x))(F(y)-F^2(y))}\cos\omega\right]+\lambda^2\right\}^{\frac{3}{2}}}. \quad (10)$$

Таким образом, построен двумерный закон распределения случайных величин, имеющих законы (функции) распределения $F(x)$ и $F(y)$. В дальнейших расчетах под x и y будут пониматься случайные значения притока в моменты времени t и t+1, т. е. будет задан нестационарный марковский процесс сезонных колебаний стока.

Условную плотность распределения, по определению, запишем в виде:

$$f(y/x) = f_1(x, y)/p(x). \quad (11)$$

Логарифмическое гамма-распределение вероятностей

Для реализации схемы динамического программирования необходимо трехпараметрическое распределение положительных величин, пригодное для описания значений стока для интервалов декада, месяц и сезон. В дальнейших расчетах в качестве безусловного (маргинального) распределения вероятностей используем логарифмическую модификацию гамма-распределения, так называемое лог-гаммовое распределение вероятностей, удобное для выполнения аналитических расчетов. Известны его приложения для максимального и минимального стока [25, 26], некоторые свойства изучены в работе [27]. Плотность вероятностей лог-гаммового распределения определяется выражением:

$$f(x) = \frac{|\alpha|}{\Gamma(b)x}\, \alpha(\alpha(\ln x - m))^{b-1} \exp(-\alpha(\ln x - m)). \quad (12)$$

Для распределения (11) известны соотношения между параметрами и моментами логарифмов исходного ряда:

$$\alpha = \frac{2}{C_{S_\Lambda}\sigma_\Lambda}, \quad (13)$$

$$b = \frac{4}{C_{S_E}^2}, \tag{14}$$

$$m = M_{\Lambda} - \frac{2\sigma_{\Lambda}}{C_{S_{\Lambda}}}, \tag{15}$$

где M_{Λ}, σ_{Λ} и $C_{S_{\Lambda}}$ – соответственно математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение и асимметрия ряда натуральных логарифмов исходных величин.

Моментные оценки C_v и C_s/C_v для данного трехпараметрического распределения являются смещенными [28]. Оценка C_v, определенная по моментам логарифмированного ряда, смещена существенно меньше, однако ее среднеквадратическая погрешность или близка к погрешности моментной оценки, или становится больше при возрастании вариации. Третий начальный момент распределения не существует при $0 < \alpha \leq 3$, поэтому график зависимости параметра α от соотношения C_s/C_v имеет две вертикальные асимптоты. Область определения зависимости $\alpha = f(C_s/C_v)$ распадается на два квадранта. В первом случае, когда асимметрия меньше $C_v^3+3C_v^2$, распределение имеет конечный верхний предел. Во втором, при $C_s > C_v^3+3C_v^2$, распределение имеет нижний предел, отличный от нуля, и чем меньше значение α, тем хуже оценка C_s.

Условное распределение стока в интервале времени t при заданном расходе воды в интервале $t - 1$ определяется для лог-гаммового распределения с помощью уравнений (10) и (11).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решение задачи организации оптимального управления водохранилищем методом стохастического динамического программирования начинается с определения параметров маргинальных распределений притока по всем расчетным интервалам и расчета коэффициентов парной корреляции, необходимых для задания условных распределений. Условные распределения вероятностей рассчитываются на основе трехпараметрического лог-пирсоновского распределения и подхода, предложенного И.О. Сармановым для построения двумерных несимметричных распределений. Далее для заданных параметров водохранилища и требуемой отдачи методом стохастического динамического программирования рассчитывается функция оптимального управления $l(i, k, t)$.

В завершение расчетов определяется функция распределения вероятностей наполнений водохранилища и отдачи на каждый расчетный интервал времени. Для расчетов вероятностей наполнений и сбросов предложен следующий алгоритм. Располагая условными распределениями стока $P(Q_j/Q_i)$ для каждого расчетного интервала времени и функцией оптимального управления $l(i, k, t)$, получаем уравнение, связывающее распределения вероятностей сбросов в смежные моменты времени PR_t и PR_{t+1}. Согласно [12], вероятность сброса в интервале $t + 1$ равна сумме всех вероятностей $PR_{k,i}$, приведших к l, умноженных на условную вероятность Q_j при известном Q_i:

$$\sum_{k,i \to l} PR_{ki}\, P(Q_j/Q_i) = PR_{l,j}\,. \tag{16}$$

Система уравнений (16) связывает распределения вероятностей сбросов в смежные моменты времени при известном условном распределении стока в последующий момент при заданном значении стока в предыдущий момент времени. Для определения интересующих нас функций распределения необходимо решить систему уравнений (16). Число уравнений (16) на единицу меньше числа расчетных интервалов.

Для решения системы уравнений (16) применим метод итераций. Для организации итерационной процедуры зададим произвольное значение двумерного распределения $PR_{k,i}$, в начальный момент времени (для первого расчетного интервала) и вычислим распределение вероятностей $PR_{l,j}$ в последующем интервале. Эту процедуру повторим для всех последующих расчетных интервалов. Полученная в ходе расчетов двумерная плотность распределения отдачи при заданном наполнении и притоке подставляется в качестве начальной для первого интервала, все вычисления повторяются требуемое число раз до достижения установившегося решения. Три-четыре итерации позволяют достичь приемлемой точности.

Применение данной итерационной процедуры можно математически интерпретировать как отображение рассматриваемого пространства решений на себя. Является ли рассматриваемое нами отображение сжимающим – вопрос специальных исследований, но в математической литературе [29] можно найти указание на сходимость итерационного процесса при небольших значениях аргументов в подобной схеме вычислений.

Функцию распределения наполнений водохранилища можно рассчитать по полученной совместной плотности сбросов:

$$PS_{kt} = \sum_i PR_{kit}. \quad (17)$$

На рисунке представлены кривые обеспеченности наполнений и сбросов Цимлянского водохранилища, рассчитанные предложенным итерационным методом для ряда расчетных интервалов. Процедура стохастического динамического программирования реализуется в два этапа. Сначала для выделенных однородных периодов осуществляется поиск оптимального управления путем решения оптимизационной задачи, а затем рассчитываются кривые обеспеченности наполнений и сбросов, соответствующие оптимальному управлению. Для сравнения полученных вероятностных результатов с оценками, получаемыми на основе имеющихся данных наблюдений, выполнены «календарные» расчеты регулирования по полученным оптимальным правилам, но для рядов наблюденных значений притока раздельно по двум условно-однородным периодам.

На рисунке кривые обеспеченности наполнений и сбросов, полученные двумя способами, совмещены. В целом имеется неплохое совпадение результатов, но следует отметить расхождения в зоне маловодных лет для летне-осенних месяцев второго, современного периода. Это расхождение объясняется наличием в ряду наблюдений группы очень маловодных лет, для корректного учета вероятности которых необходимо располагать более продолжительным набором данных или использовать более сложную модель временного хода притока.

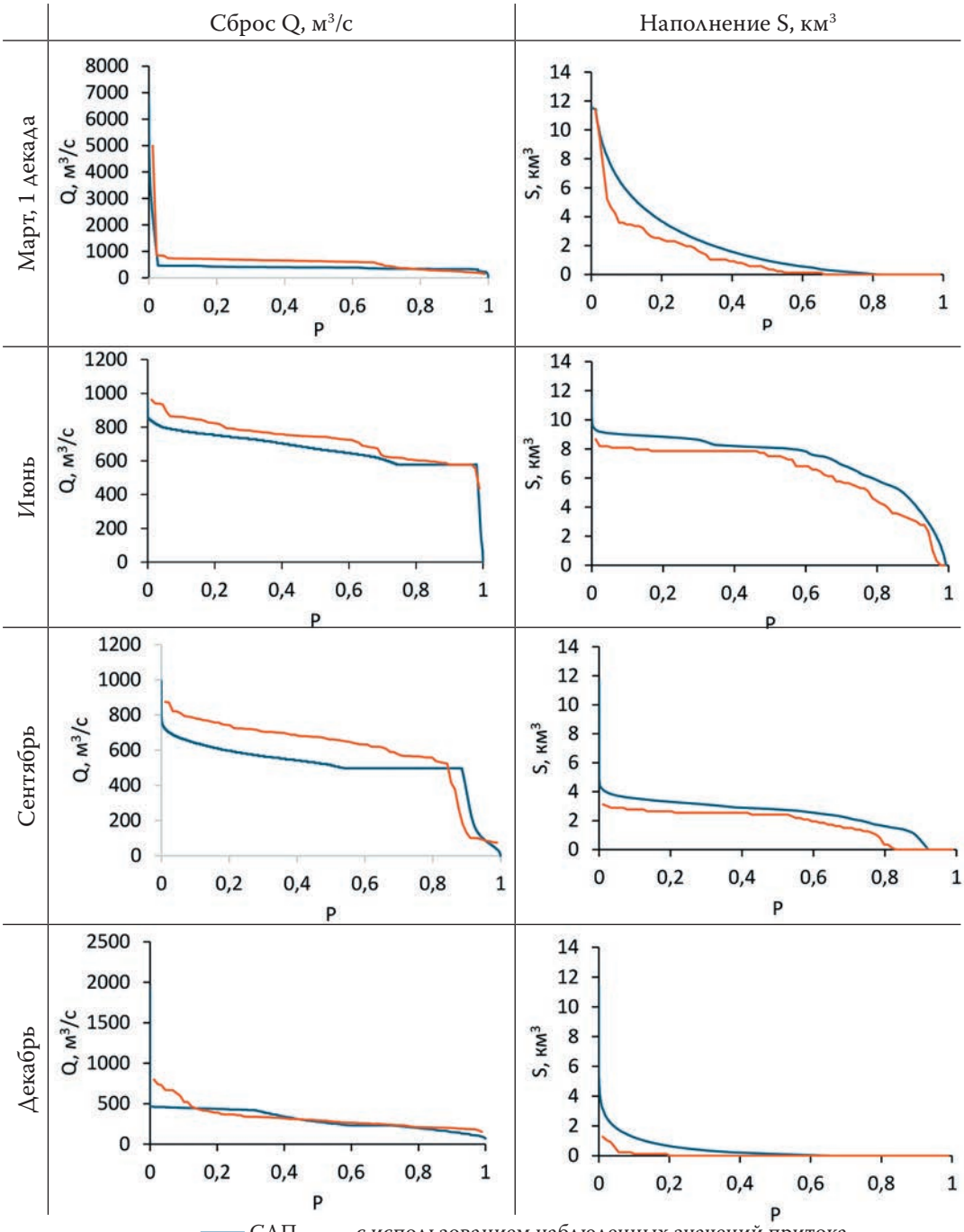


Рис. 1. Кривые обеспеченности наполнений и сбросов Цимлянского водохранилища по расчетным интервалам для двух условно-стационарных периодов до 1970 г.
Fig. 1. The laws of the distribution of fillings and discharges of the Tsimlyansk reservoir according to the calculated intervals for two conditionally stationary periods up to 1970.

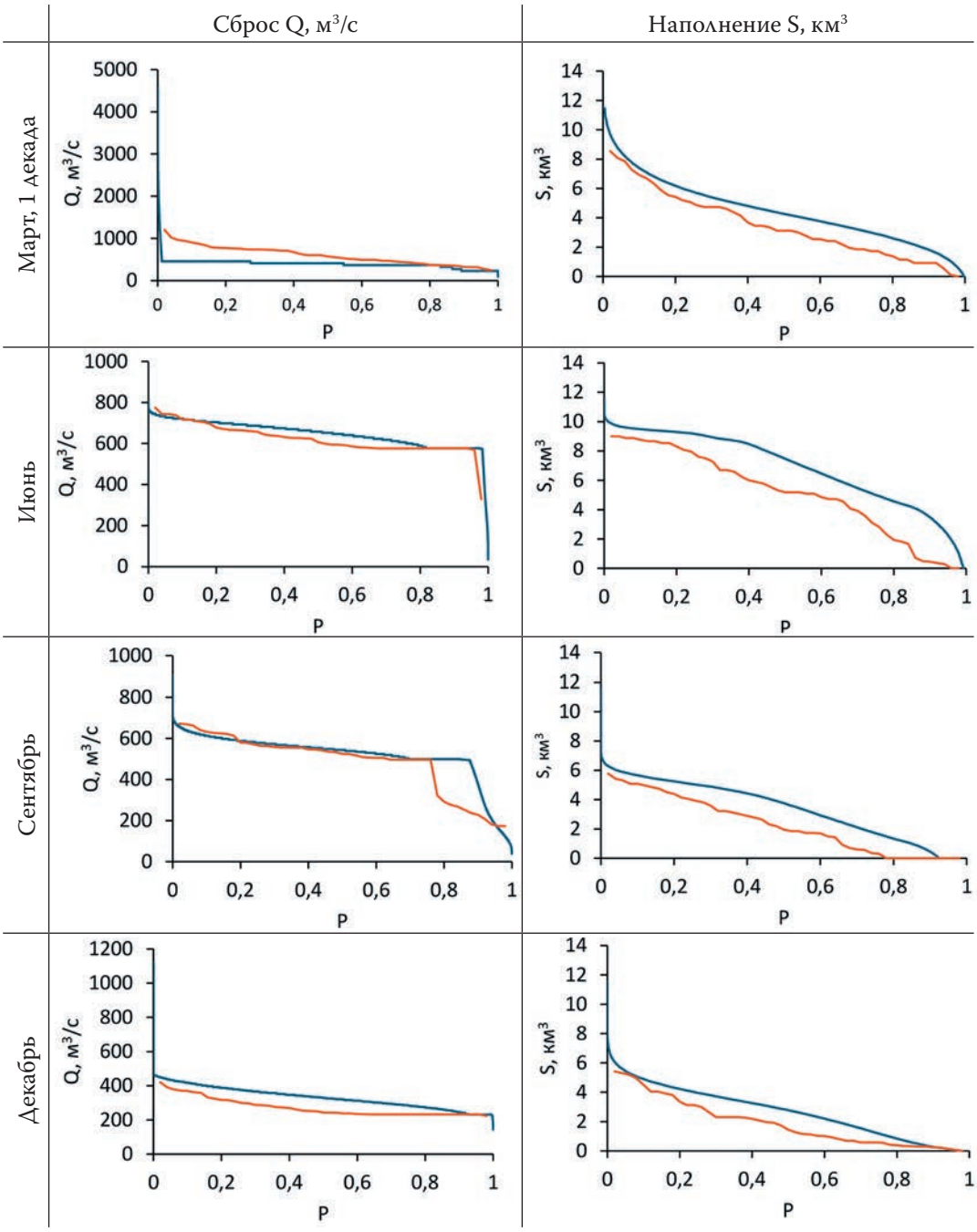


Рис. 2. Кривые обеспеченности наполнений и сбросов Цимлянского водохранилища по расчетным интервалам для двух условно-стационарных периодов после 1970 г.
Fig. 1. The laws of the distribution of fillings and discharges of the Tsimlyansk reservoir according to the calculated intervals for two conditionally stationary periods after 1970.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитанные методом стохастического динамического программирования оптимальные правила управления водохранилищем позволяют получать искомые вероятностные характеристики работы водохранилища для задаваемых значений параметров распределений притока. Традиционно эти параметры определяются по имеющимся рядам наблюдений и предполагается стационарность во времени.

В связи с происходящими климатическими изменениями возникает новая постановка задачи: стационарность нарушается и прогноз будущего режима характеризуется большой неопределенностью. В этом случае для проведения водохозяйственных расчетов требуются другие подходы, рассмотренные в данной статье. В частности, рекомендуется выделять условно-однородные периоды и выполнять для них поиск оптимального режима управления.

Рекомендуемые подходы позволяют рассчитывать характеристики отдачи водохранилища при заданных значениях параметров притока для будущих климатических ситуаций. В этом случае параметры маргинальных распределений притока в расчетные интервалы времени задаются исходя из принятых гипотез о влиянии климатических изменений на гидрологический режим. В качестве итогового решения может быть принята байесовская оценка гарантированной отдачи для совокупности сценарных вариантов.

Благодарность

Автор выражает признательность д-ру техн. наук А.Е. Косолапову за советы и полезные обсуждения проблематики оптимального регулирования стока водохранилищ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Бубер А.Л., Лотов А.В. Поддержка принятия стратегических решений по обеспечению водой Нижней Волги на основе визуализации границы Парето // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. № 1. С. 84–97. http://www.isa.ru/aidt/2017-01/84_97.pdf .
2. Болгов М.В., Бубер А.Л., Комаровский А.А., Лотов А.В. Поиск компромиссных решений при планировании и управлении попусками в нижний бьеф Волгоградского гидроузла. 1. Стратегическое планирование // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 5. С. 573–580. https://doi.org/ 10.1134/S0321059618050048.
3. Болгов М.В., Бубер А.Л., Комаровский А.А., Лотов А.В. Поиск компромиссных решений при планировании и управлении попусками в нижний бьеф Волгоградского гидроузла. 2. Тактическое планирование и оперативное управление // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 3. С. 333–344. https://doi.org/ 10.31857/S0321-0596463333-344.
4. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 392 с.
5. Саваренский А.Д. Регулирование речного стока водохранилищами. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 236 с.
6. Моран П. Теория водохранилищ. Оптимальное регулирование стока водохранилищами гидростанций: сб. переводов под ред. Н.А. Картвелишвили. М.: Госэнергоиздат, 1963. С. 10–43.
7. Картвелишвили Н.А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л.: Гидрометиздат, 1967. 291 с.
8. Чокин Ш.Ч. Расчетная обеспеченность работы гидроэлектростанций. Алма-Ата: Изд-во АН Казахской ССР, 1958. 271 с.

9. Цветков Е.В. Расчет оптимального регулирования стока водохранилищами ГЭС на ЦВМ. М.: Энергия, 1967. 135 с.
10. Елаховский С.Б. Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. М.: Энергия, 1979. 191 с.
11. Великанов А.Л., Коробова Д.Н. Применение метода динамического программирования к распределению водных ресурсов. Проблемы изучения и использования водных ресурсов. М.: Наука, 1972. С.101–108.
12. Loucks D.P., Stedinger J.R., Haith D.A. Water resource systems planning and analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981. 559 p.
13. Агальцева Н.А., Болгов М.В., Спекторман Т.Ю., Трубецкова М.Д., Чуб В.Е. Оценка гидрологических характеристик в бассейне Амударьи в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С. 58–69.
14. Липавский А.С., Елисеев А.В., Мохов И.И. Байесовы оценки изменения стока Амура и Селенги в XXI веке по результатам ансамблевых модельных расчетов CMIP6 // Метеорология и Гидрология. 2022. №5. С. 64–82. https://doi.org/ 10.52002/0130-2906-2022-5-64-82.
15. Davidsena C., Liub S. Mob X., Holmc P., Trappa S., Rosbjerg D., Bauer-Gottweina P. Hydroeconomic optimization of reservoir management under downstream water quality constraints // Journal of Hydrology. 2015. Vol. 529. Part 3. P. 1679–1689. https://doi.org/ 10.1016/j.jhydrol.2015.08.018.
16. Subroto T., Bisri M., Limantara L.M., Soetopo W. Optimization Model of the Way Rarem Reservoir Operation Pattern by Using Stochastic Dynamic Programming // Journal of Hunan University (Natural Sciences). 2021. Vol. 48. No. 11. P. 317–326.
17. Phan Thi Thu Phuong, Dao Thi Ngoc Han, Hoang Van Lai, Bui Dinh Tri Reservoirs optimization with dynamic programming // Vietnam Journal of Mechanics. 2017. VAST. Vol. 39. No. 3. P. 191–202. https://doi.org/10.15625/0866-7136/8334.
18. Левит-Гуревич Л.К. Метод динамического программирования для выбора рационального водораспределения в дельте реки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1 (4). С. 950–956.
19. Mousavi S.J., Ponnambalam K., Karray F. Reservoir Operation Using a Dynamic Programming Fuzzy Rule–Based Approach // Water Resources Management. 2005. No. 19. P. 655–672. https://doi.org/ 10.1007/s11269-005-3275-3.
20. Luo B., Maqsood I., Huang G.H. Planning water resources systems with interval stochastic dynamic programming // Water Resources Management. 2007. No. 2. P. 997–1014. https://doi.org/10.1007/s11269-006-9069-4.
21. Muhammad Y.S., Pflug G.C. Stochastic vs. deterministic programming in water management: the value of flexibility // Annals of Operations Research. 2014. No. 223. P. 309–328. https://doi.org/ 10.1007/s10479-013-1455-8.
22. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Условные распределения вероятностей внутригодовых колебаний стока рек снегового питания // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 3. С. 261–266.
23. Сарманов О.В. Исследование стационарных марковских процессов методом разложения по собственным функциям // Труды МИАН. 1961. Т. 60. С. 239–261. https://www.mathnet.ru/links/230e4dda01a91b8e4c2274eb4594d074/tm1492.pdf.
24. Сарманов И.О. О корреляции между функциями зависимых случайных величин, имеющих гидрологическое приложение // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. М.: Наука, 1973. С. 87–103.
25. Bobée B. The Log Pearson Type 3 Distribution and Its Application in Hydrology // Water Resources Research. 1975. Vol. 11. No. 5. P. 681–689.
26. Condie R. The Log Pearson type 3 distribution: The T-year event and its asymptotic standard error by maximum likelihood theory // Water Resources Research. 1977. Vol. 13. No. 6. P. 987–991.
27. Hoshi K., Leeyavanija U. A New Approach to Parameter Estimations of Gamma-type Distributions // Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering. 1986. Vol. 4. No. 2. P. 79–85.
28. Болгов М.В., Сарманов И.О. Логарифмическое гамма-распределение вероятностей и его приложения в гидрологических расчетах // Водные ресурсы. 1996. № 2. С.146–152.
29. Мышкис А.Д. Математика для ВТУЗОВ. Специальные курсы. М.: Наука, 1971. 632 с.

REFERENCES

1. Bolgov M.V., Buber A.L., Lotov A.V. Decision support for strategic decision making on water supply of the Lower Volga River based on Pareto frontier visualization. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2017. 1. P. 84–97.
2. Bolgov M.V., Buber A.L., Komarovskiy A.A. and Lotov A.V. Searching for Compromise Solution in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 1. Strategic Planning. *Water Resources.* 2018, Vol. 45. No. 5. P. 819–826. https://doi.org/ 10.3103/S1068373918100023.
3. Bolgov M.V., Buber A.L., Komarovskiy A. A., and Lotov A. V. Search for Compromise Decisions in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 2. Tactical Planning and Dispatching Control. *Water Resources.* 2019. Vol. 46. 3.P. 480–491. https://doi.org/ 10.1134/S0097807819030047.
4. Kritskiy S. N., Menkel M.F. Water management calculations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962. 392 p. (In Russ.).
5. Savarensky A.D. Regulation of river flow by reservoirs. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House, 1951. 236 p. (In Russ.).
6. Moran P. Theory of reservoirs. In Optimal regulation of runoff by reservoirs of hydraulic power plants. Collection of translations edited by N.A. Kartvelishvili M.: Gosenergoizdat, 1963. P. 10–43 (In Russ.).
7. Kartvelishvili N.A. Theory of probabilistic processes in hydrology and regulation of river flow. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 291 p. (In Russ.).
8. Chokin Sh. Ch. Estimated availability of hydroelectric power plants. Alma-Ata: Publishing House of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, 1958. 271 p. (In Russ.).
9. Tsvetkov E.V. Calculation of Optimal Regulation of HPP Water Flow Using Digital Computers. Moscow: *Energy*. 1967. 135 p. (In Russ.).
10. Elakhovsky S.B. Hydroelectric power stations in water management systems. Moscow: *Energy*. 1979. 191 p. (In Russ.).
11. Velikanov A.L., Korobova D.N. Application of the dynamic programming method to the distribution of water resources. *Problems of the study and use of water resources.* Moscow: Nauka, 1972. P. 101–108 (In Russ.).
12. Loucks D.P., Stedinger J.R., Haith D.A. Water resource systems planning and analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981. 559 p.
13. Agaltseva N.A., Bolgov M.V., Spektorman T.Y., Trubetskova M.D., Chub V.E. Estimating hydrological characteristics in the Amu Darya River basin under climate change conditions. *Meteorology and Hydrology.* 2011. No. 10. P. 58–69. https://doi.org/10.3103/S1068373911100062.
14. Lipavskiy A.S., Eliseyev A.V., Mokhov I.I. Bayesian projections of the Amur and Selenga river runoff changes in the 21st century based on CMIP6 model ensemble simulations. *Meteorology and Hydrology.* 2022. No. 5. P. 64–82. https://doi.org/10.3103/s1068373922050065.
15. Davidsena C., Liub S. Mob X., Holmc P., Trappa S., Rosbjerg D., Bauer-Gottweina P. Hydro/economic optimization of reservoir management under downstream water quality constraints. *Journal of Hydrology*, Vol. 529. Part 3. October, 2015. P. 1679–1689. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.018.
16. Subroto T., Bisri M., Limantara L. M., Soetopo W. Optimization Model of the Way Rarem Reservoir Operation Pattern by Using Stochastic Dynamic Programming. *Journal of Hunan University (Natural Sciences).* Vol. 48. No. 11. November, 2021. P. 317–326.
17. Phan Thi ThuPhuong, Dao Thi Ngoc Han, Hoang Van Lai, Bui Dinh Tri. Reservoirs optimization with dynamic programming. Vietnam Journal of Mechanics. VAST. Vol. 39. No. 3 (2017). P. 191–202. https://doi.org/10.15625/0866-7136/8334.
18. Levit-Gurevich L.K. A dynamic programming method for selecting rational water distribution in a river delta. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010. Vol. 12. No. 1 (4). P. 950–956.
19. Mousavi S.J., Ponnambalam K., Karray F. Reservoir Operation Using a Dynamic Programming Fuzzy Rule–Based Approach. *Water Resources Management.* 2005. No. 19. P 655–672. https://doi.org/10.1007/s11269-005-3275-3.

20. Luo B., Maqsood I., Huang G.H. Planning water resources systems with interval stochastic dynamic programming. *Water Resources Management.* 2007. No. 1. P. 997–1014. https://doi.org/10.1007/s11269-006-9069-4.
21. Muhammad Y.S., Pflug G.C. Stochastic vs. deterministic programming in water management: the value of flexibility. *Annals of Operations Research.* 2014. No. 223. P. 309–328. https://doi.org/10.1007/s10479-013-1455-8.
22. Bolgov M.V., Ratkovich D.Y. Conditional probability distributions of annual variations in the runoff of rivers with snowmelt alimentation. *Water Resources*. 1996. Vol. 23. No. 3. P. 235-240.
23. Sarmanov O.V. Study of Stationary Markov Processes by Eigen functional Decomposition. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics.* 1960. Vol. 60. P. 239–261. https://www.mathnet.ru/links/230e4dda01a91b8e4c2274eb4594d074/tm1492.pdf (In Russ.).
24. Sarmanov I.O. On the correlation between functions of dependent random variables with a hydrological application. *Problems of regulation and use of water resources.* Moscow: Nauka, 1973. C. 87–103 (In Russ.).
25. Bobée B. The Log Pearson Type 3 Distribution and Its Application in Hydrology. *Water Resources Research*. 1975. Vol. 11. No. 5. P. 681–689.
26. Condie R. The Log Pearson type 3 distribution: The T-year event and its asymptotic standard error by maximum likelihood theory. *Water Resources Research.* 1977. Vol. 13. No. 6. P. 987–991.
27. Hoshi K., Leeyavanija U. A New Approach to Parameter Estimations of Gamma-type Distributions. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*. 1986. Vol. 4. No. 2. P. 79–85.
28. Bolgov M.V., Sarmanov I.O. Logarithmic gamma probability distribution and its application to hydrological calculations. *Water Resources*. 1996. No. 2. P. 129–135 (In Russ.).
29. Myshkis A.D. Mathematics for higher technical education institutions. Special courses. Moscow: Nauka, 1971. 632 p. (In Russ.).

Сведения об авторе:

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; главный научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, зд. 10а; https://orcid.org/ 0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

About the author:

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; Chief Researcher, Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; https://orcid.org/ 0000-0003-3193-6488, bolgovmv@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 24.12.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 09.01.2025.
Принята к публикации / Accepted 27.01.2025.

УДК 528.88: 556.15 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56*

Долгосрочные фазовые изменения озер Южного Приаралья

Ф.Я. Артыкова[1], С.Б. Калабаев[1,2]

salauat.kalabaev@gmail.com

[1]*Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Республика Узбекистан*
[2]*Каракалпакский государственный университет имени Бердака, г. Нукус, Республика Узбекистан*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Подробное изучение гидрологического режима озер Южного Приаралья является актуальной задачей, однако следует отметить, что этот вопрос осложняется отсутствием систематических наблюдений. В настоящее время по космическим снимкам можно получить информацию о водных объектах в труднодоступных районах. В исследовании выполнено картирование шести озер, расположенных на территории Южного Приаралья. Картирование выполнено в разное время и в различные фазы гидрологического режима озер. **Методы.** Для района исследования выбраны спутниковые снимки исследовательского центра Геологической службы США (USGS) и базы данных Европейской комиссии за период 1984–2021 гг. На следующем этапе проведены расчеты с использованием программного обеспечения ArcGIS. В работе использованы гидрологические расчеты, методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), методы water index для дешифрирования спутниковых снимков. Проанализированы методы декодирования космических изображений NDWI, MNDWI для определения площади поверхности озер. **Результаты.** Расчеты показали сокращение площади озер от 28,92 % до 93,3 %. В ходе исследований установлено, что озера Муйнак, Сарибас, Междуручье и Дауткуль трансформировались в сезонные озера, а озера Судочье, Джылтырбас пока остаются постоянными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Южное Приаралье, озеро, Landsat, дистанционное зондирование, NDWI, MNDWI, мониторинг, картографирование.

Для цитирования: Артыкова Ф.Я., Калабаев С.Б., Долгосрочные фазовые изменения озер Южного Приаралья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 40–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56, EDN: FMYLKP

Long-Term Phase Changes In The South Aral Sea Region Lakes

Farida Y. Artykova[1], Salauat B. Kalabaev[1,2]

salauat.kalabaev@gmail.com

[1]*Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan*
[2]*Karakalpak State University named after Berdak, Nukus, Republic of Uzbekistan*

ABSTRACT

Relevance. A detailed study of the hydrological regime of lakes is an urgent task, however, it should be noted that this issue is complicated by the lack of systematic observations on lakes. In such cases, satellite images can be used to obtain information about water bodies in hard-to-

© Артыкова Ф.Я., Калабаев С.Б., 2025

reach areas. The study carried out mapping of six lakes located in the Southern Aral Sea region. The mapping was carried out for different dates and different phases of the hydrological regime of the lakes in the presence of water in them. **Methods.**For the study area, satellite images from the United States Geological Survey (USGS) research center and the European Commission database for the period 1984-2021 were selected. At the next stage, calculations were carried out using ArcGIS software. To this end, this article examined several methods for decoding satellite images to determine the water surface area of a lake. In the research used hydrological calculations, methods of remote sensing of the Earth (RSE), and "water index" methods for decoding satellite images. In particular, decoding methods of NDWI and MNDWI space images were analyzed to determine the surface area of the lake. **Results.** As a result of the calculation, the reduction in the area of lakes amounted to 28.92-93.3%. As a result of the research, it was found that all the studied lakes became seasonal. As a result of the research, it was established that lakes Muynak, Saribas, Mezhdurechye and Dautkul have turned into seasonal lakes, while lakes Sudochye and Jyltyrbas still remain permanent.

KEYWORDS: Southern Aral Sea region, lake, Landsat, remote sensing, NDWI, MNDWI, monitoring, mapping.

For citation: Artykova F.Y., Kalabaev S.B. Long term phase changes in the South Aral Sea zone lakes. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies. Management.* 2025. No. 1. P. 40–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56, EDN: FMYLKP

ВВЕДЕНИЕ

Озера и водохранилища содержат около 21 % мировых запасов пресной воды [1]. Установлено, что количество водных объектов площадью 10 га во всем мире с 1995 по 2015 г. составило более 1,42 млн [2]. Исследования, проведенные на основе дистанционного зондирования, показывают, что в период с 1984 по 2015 гг. в глобальном масштабе исчезло почти 90 тыс. км^2 ранее существовавших постоянных водоемов. Однако на других территориях появились новые постоянные водные объекты, занимающие площадь 184 тыс. км^2 [3]. Более 70 % исчезнувших по всему миру постоянных водоемов приходится на территории Казахстана, Узбекистана, Ирана, Афганистана, Ирака [4].

Следует также отметить, что на территориях, расположенных от 41° до 45° с. ш. и с 58° до 60° в. д., значительно сократились площади постоянной водной поверхности. Восточная часть Аральского моря на границе Казахстана и Узбекистана превратилась в пустыню [5]. Резкое сокращение поверхности Аральского моря наблюдалось в период 1994–2009 гг., в последнее время этот процесс замедлился [6].

При дешифрировании спутниковых изображений, для определения границы «суша–вода», использовались методы water index [7]. В этом направлении исследования велись такими известными учеными, как McFeeters S.K. [8], Xu H. [9], Sun F. [10], Feyisa G.L. [11], Курганович К.А. [12], Морозова В.А. [13] и Шмакова В.Ю. [14].

В целях эффективной организации использования природных ресурсов в мире проводится картографирование и модернизируются методы исследования. В этом направлении важными считаются вопросы мониторинга водных ресурсов с применением ГИС-технологий и методов дистанционного зондирования.

Озера Узбекистана имеют важное географическое и социально-экономическое значение. Они содержат запасы пресной воды, определяют окружающий микроклимат, являются средой обитания разнообразной флоры и фауны, используются для рыбоводства и отдыха. Мониторинг гидрологического режима и современного состояния озер в регионе Южного Приаралья особенно актуален в период, когда глобальный дефицит водных ресурсов увеличивается, и эта тенденция будет усугубляться с наблюдающимся изменением климата.

Цель проведенного исследования – организация мониторинга состояния озер, расположенных на территории Южного Приаралья, на основе данных дистанционного зондирования Земли в условиях изменения климата.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спутниковые снимки за 1984–2021 годы отобраны из базы данных Научно-исследовательского центра озер Геологической службы США (USGS) и Европейской комиссии. Динамика водной поверхности озер регистрировалась с помощью спутниковых наблюдений, а изображения Landsat использовались для составления карты сезонности каждого озера. Снимки Landsat являются единственными первичными данными для долгосрочного мониторинга поверхностных водных объектов. С 2008 г. Геологическая служба США (USGS) предоставляет в свободный и открытый доступ изображения Landsat, имеющие большое значение для научных исследований и практического применения.

Использован весь архив Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper-plus (ETM+) и Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) ортотрансформированных изображений отражательной способности верхней части атмосферы и яркостной температуры (L1T), полученных в период с 16 марта 1984 г. по 30 декабря 2021 г. Landsat 5, 7 и 8 находятся на околополярной орбите с повторным покрытием каждые 16 дней; два спутника работают одновременно с 8-дневным циклом. Земная область, снимаемая с соседних орбит, перекрывается на 7,3 % на экваторе, увеличиваясь до 68,3 % перекрытия на широте 70°.

Исследуемые водоемы весьма изменчивы, а их спектральные свойства на длинах волн, измеряемых датчиками TM, ETM+ и OLI, также изменяются в зависимости от концентрации хлорофилла в воде, количества взвешенных частиц, цвета растворенных органических веществ, содержащихся в водной массе озер, а также состава отложений на дне и в мелководье [8, 16].

Для дистанционного определения площадей водной поверхности озер по космическим съемкам широко применяются следующие методы обработки спутниковых спектральных индексов (водных индексов): тематическая классификация с обучением, линейное разделение, одноканальная классификация с использованием порога разделения.

На практике для выделения границы «суша/вода» широко используются спектральные индексные изображения вследствие минимальных трудозатрат при хороших результатах.

Для распознавания водных объектов на спутниковых изображениях существует множество спектральных индексов, которые называются водными

индексами. С их помощью определяется водность на подстилающей поверхности. Наиболее популярные из них описаны ниже.

Спектральный нормализованный разностный водный индекс NDWI (*Normalized Difference Water Index*) был предложен в 1996 г. McFeeters. Индекс позволяет выявлять увлажненность растительности, кроме того, он используется для мониторинга водных объектов. Вычисляется по формуле:

$$NDWI = \frac{green - nir}{green + nir}, \quad (1)$$

где *green* – излучение в зеленом участке спектра (0,5–0,6 мкм);

nir – излучение в инфракрасном участке спектра (0,7–0,9 мкм).

В 2006 г. было установлено, что индекс NDWI недостаточно эффективен для выявления водных поверхностей и отделения комбинированных поверхностей. На основе идеи индекса NDWI H. Xu предложил новый модифицированный нормализованный разностный водный индекс – MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) [3]. Индекс MNDWI рассчитывается по формуле:

$$MNDWI = \frac{green - swir}{green + swir}, \quad (2)$$

где *green* – излучение в зеленом участке спектра (0,5–0,6 мкм);

swir – излучение в среднем инфракрасном участке спектра (1,55–1,75 мкм).

Преимуществом этого индекса является его способность эффективно подавлять или удалять шумовые эффекты почвы и растительности, что позволяет более точно определить водные объекты на любой подстилающей поверхности. Помимо информации спутников серии Landsat индекс MNDWI возможно извлечь по данным других спутниковых систем – SPOT и TERRA (прибор MODIS), Sentinel-1, 2, что говорит о его универсальности и стабильности. Тем не менее при выделении водных поверхностей на спутниковых изображениях с помощью индекса MNDWI могут возникнуть сложности при наличии на них объектов с малой величиной альбедо, таких как автодороги, тени от облаков, гор или высоких зданий. Граница раздела «суша/вода» проходит через ноль, значения индекса больше соответствуют водным поверхностям. В результате ряда исследований [3, 9, 15] оказалось, что индекс MNDWI является наиболее подходящим методом для определения водной поверхности в районе исследования.

В представленной работе использован метод дешифрирования водных поверхностей по многоканальным спектральным индексам MNDWI. Экспертная система с веб-интерфейсом, разработанная Google Earth Engine, позволяет обрабатывать любые изображения Landsat 5, 7 и 8 [17].

При расчете площади поверхности озера мультиспектральные спутниковые снимки Landsat 5, 7, 8 серий были преобразованы в универсальную поперечную проекцию Меркатора.

Расчет площади озер в программе ArcGIS проводился с помощью инструментов Image Classification и Spatial Analyst методом дешифрирования спутниковых изображений. (рис. 1).

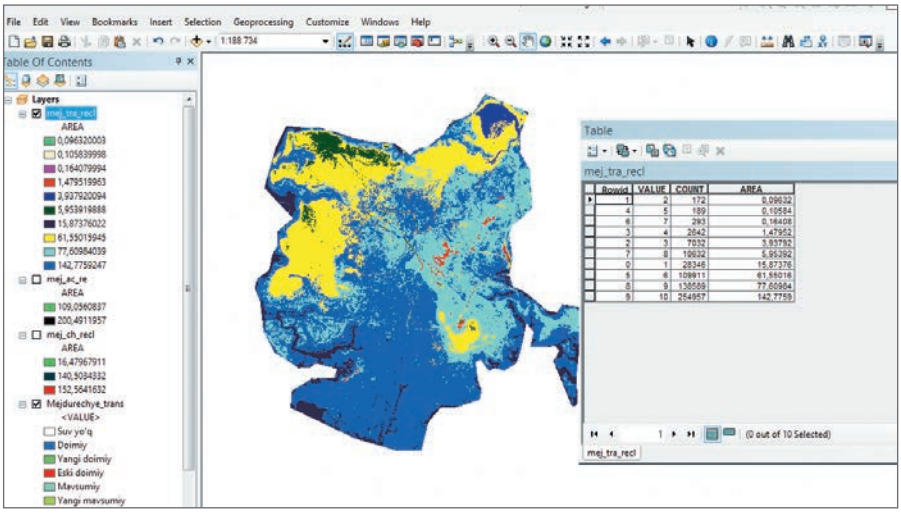


Рис. 1. Расчет площади водной поверхности озера на переходных фазах в программе ArcGIS.

Fig. 1. Calculation of the area of the lake water surface during transition phases in ArcGIS software.

На основе продукта «Появление водной поверхности» (SWO) в программном обеспечении ArcGIS была создана карта «Распространение поверхностных вод». На карте изображены территории, где собирались поверхностные воды в период 1984–2021 гг., и представлена информация о межгодовой и годовой изменчивости общей площади водной поверхности [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно, многолетняя и годовая изменчивость как площадей водной поверхности, так и остальных морфометрических характеристик озер зависит от количества притока воды. Питание изучаемых дельтовых озер осуществляется речными водами Амударьи и коллекторно-дренажным стоком, поступающим с орошаемых полей северных районов Республики Каракалпакстан. Атмосферные осадки в водном балансе приаральских озер составляют очень незначительную долю, их величина для этого региона в среднем за многолетие (1984–2010 гг.) – 136 мм/год [5]. Поэтому для понимания гидрологического режима изучаемых дельтовых озер необходимо рассмотреть основные источники их питания.

Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что в многоводные годы в бассейне реки Амударьи поступление воды в дельтовые озера увеличивается. Так, например, озера Дауткуль, Междуречье, Сарыбас и озеро в заливе Муйнак подпитываются поступающей по каналам амударьинской водой, в результате их водная поверхность увеличивается в зависимости от водности лет. По данным наблюдений на р. Амударье, в замыкающем гидростворе Саманбай в многоводные 1992, 1998 и 2010 годы объем годового притока составил, соответственно, 24,2 км^3/год, 20,0 и 16,8 км^3/год, а в маловодные 2001, 2007, 2008 годы объем стока оценивался в 0,1 км^3/год, 0,57 и 0,32 км^3/год.

Озеро Судочье подпитывается коллектором ККС и Устюрт, а в оз. Джылтырбас сбрасывают воду коллекторы КС-1 и КС-3, собирающие воду с северных орошаемых земель Каракалпакии. Речные воды также подпитывают оз. Джылтырбас по протоке Казакдарье – дельтовому рукаву Амударьи, туда же сбрасывается часть стока коллектора КС-1. Суммарный годовой объем стока коллекторов и протоки Казакдарья в многоводном 2010 г. составил 2,225 км^3/год, а в маловодном 2001 г. – 0,962 км^3/год. Расходная часть водного баланса всех озер, кроме оз. Междуречье, состоит в основном из испарения с водной поверхности, а из оз. Междуречье вода сбрасывается в расположенные ниже озера Сарыбас и Муйнак.

Определение площадей водной поверхности дельтовых озер по космоснимкам и сбор данных для картирования шести озер за разные сроки и различные фазы их гидрологического режима выполнялись на основе продукта «Интенсивность изменения явления» (*Surface water occurrence*). В программном обеспечении ArcGIS была создана карта «Интенсивность изменения распространения поверхностных вод». На карте показано распространение поверхностных вод в периоды с 1984–1999 гг. по 2000–2021 гг., а также отмечено, какие части озер увеличились, уменьшились или остались неизменными [3,18].

На основе продукта «Переходы» в программном обеспечении ArcGIS создана карта «Фазы перехода», на которой показаны различия между тремя фазами водной поверхности: *not water* – безводная, *seasonal* – сезонная и *permanent* – постоянная, основанные на изменениях водной поверхности в разные сезоны (зима, весна, лето, осень) с первого до последнего года. Переходные фазы описывают 11 переходов от первого до последнего года наблюдений.

Ниже приведены типы переходных фаз: постоянная водная поверхность – состояние, когда на всех космоснимках (1984–2021 гг.) отмечалась вода; новая постоянная водная поверхность – изменившаяся к 2021 г. постоянная водная поверхность; старая постоянная водная поверхность – до 2021 г. была постоянной водной поверхностью; сезонная водная поверхность – возникает в определенные сезоны года; новая сезонная водная поверхность – изменившаяся к 2021 г. сезонная водная поверхность; старая сезонная водная поверхность – ранее существовала в определенный сезон года, а теперь ее нет; водная поверхность, изменившаяся с постоянной на сезонную, – к 2021 г. водная поверхность стала сезонной; водная поверхность, изменившаяся из сезонной в постоянную, – к 2021 г. водная поверхность стала постоянной, т. е. в течение всего года есть вода; временно постоянная – в определенный период года постоянно есть вода; временные сезонные водные поверхности – появляются в разные годы и в разные сезоны года.

Картирование изменений залива Муйнак, озер Сарибас, Междуречье, Джылтырбас, Судочье, Даутколь в 1984–2021 гг. выполнено в ArcGIS на основе продуктов «Появление поверхностных вод», «Интенсивность изменения встречаемости» и «Переходы», созданных Дж.Ф. Пекелем. Сначала было картировано появление воды на суше и рассчитаны сезонные и постоянные водные поверхности (рис. 2).

а

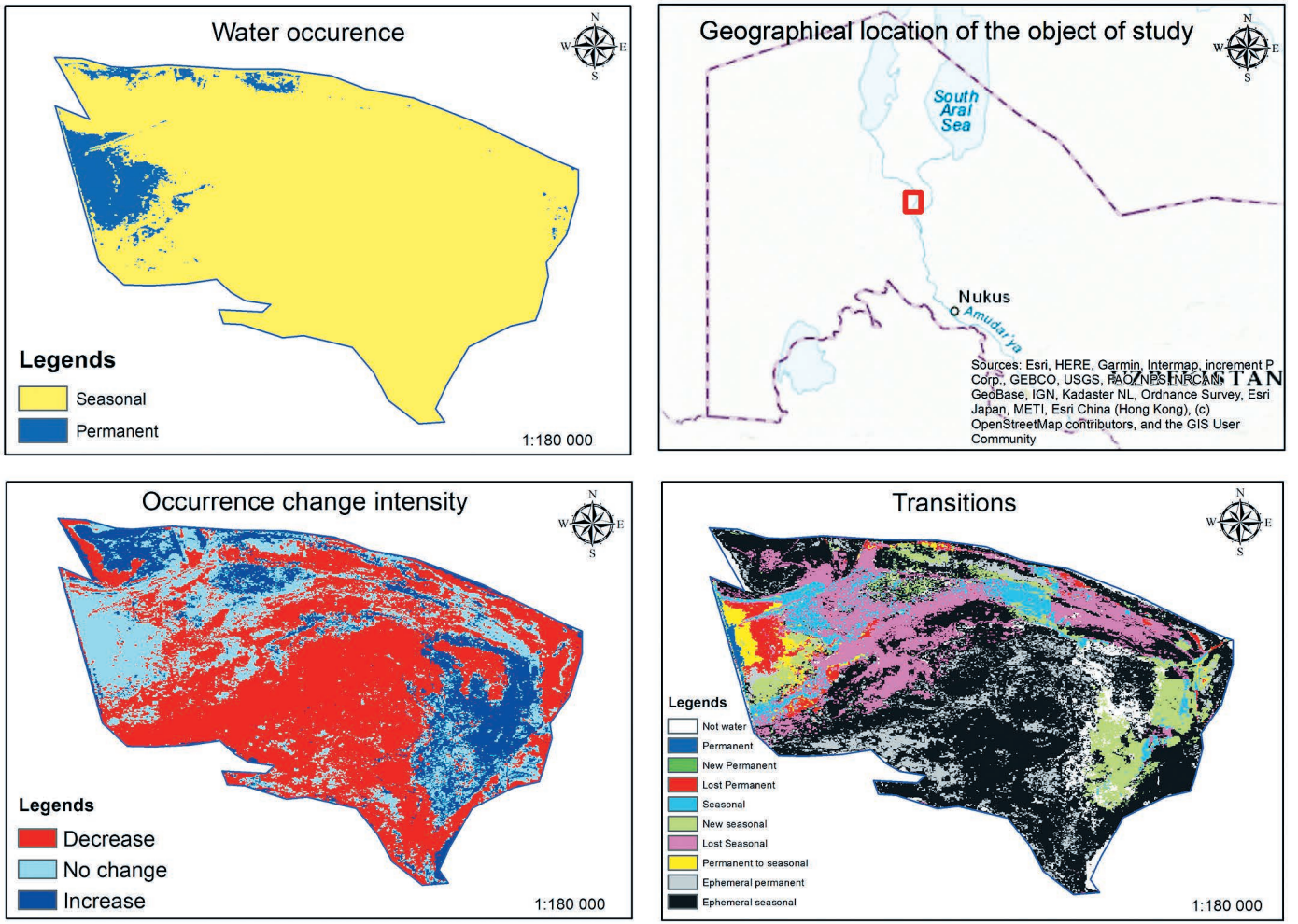


Рис. 2. Карты распространения поверхностных вод, интенсивности изменения распространения поверхностных вод, переходных фаз в озерах Муйнак (*а*), Сарибас (*б*), Междуречье (*в*), Джылтырбас (*г*), Судочье (*д*) и Дауткуль (*е*).

Fig. 2. Maps of the surface water occurrence, surface water occurrence change intensity, transition phases in Moynaq (*a*), Saribas (*b*), Mezhdurechye (*d*), Dyltyrbas (*e*), Sudochye (*f*) va Dautkul (*g*) lakes.

б

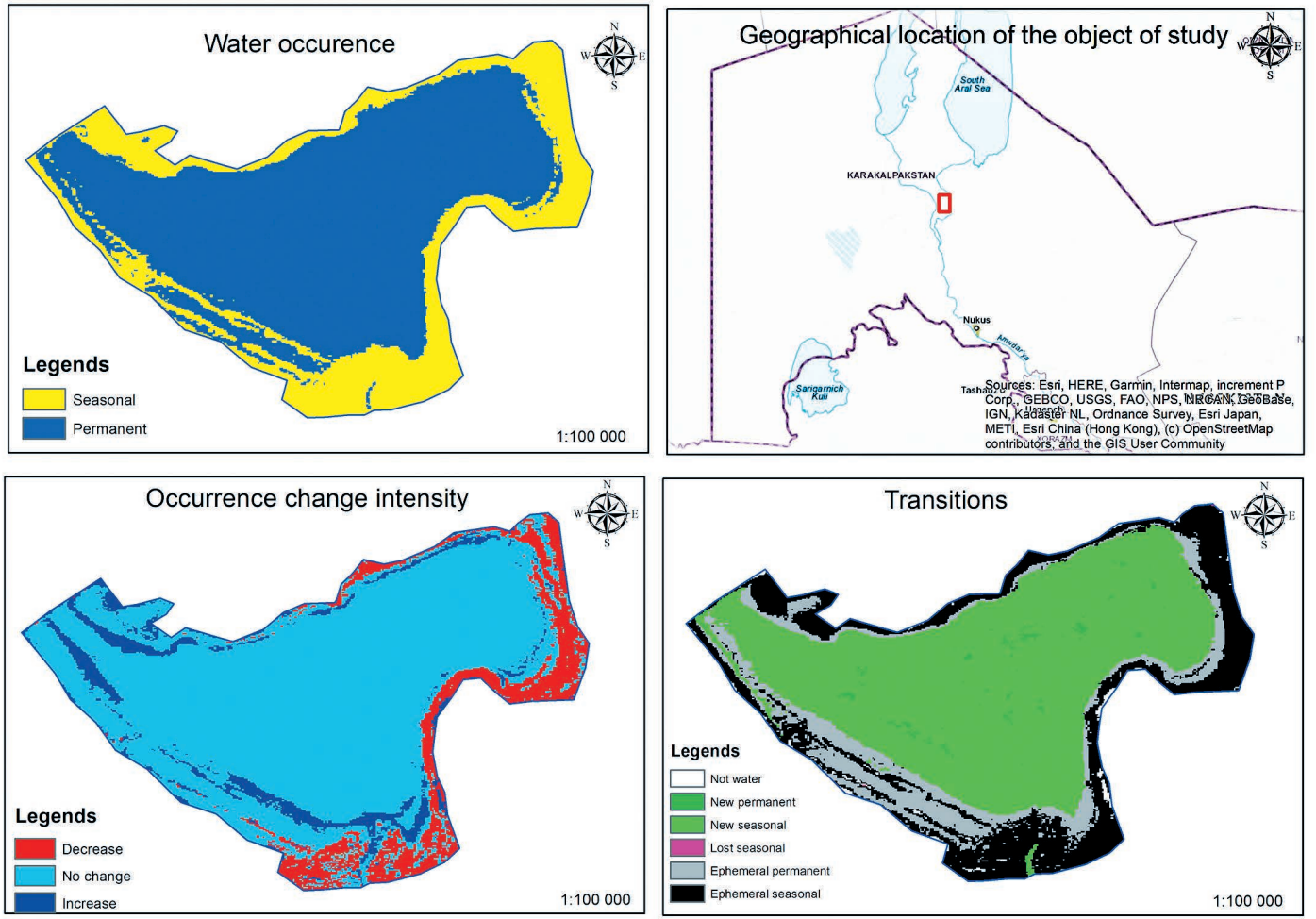
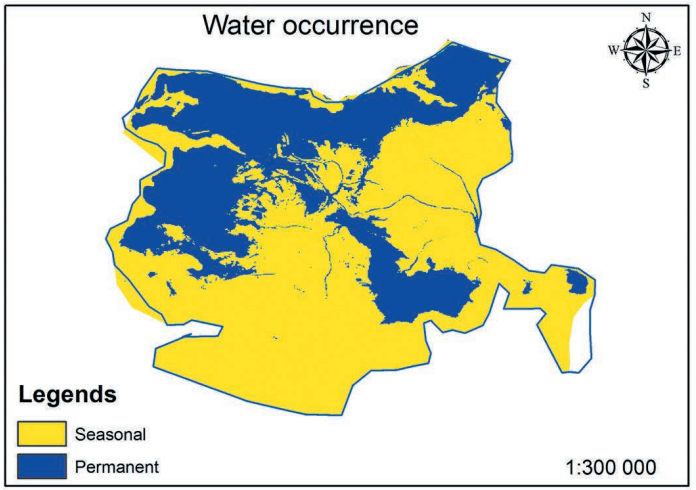
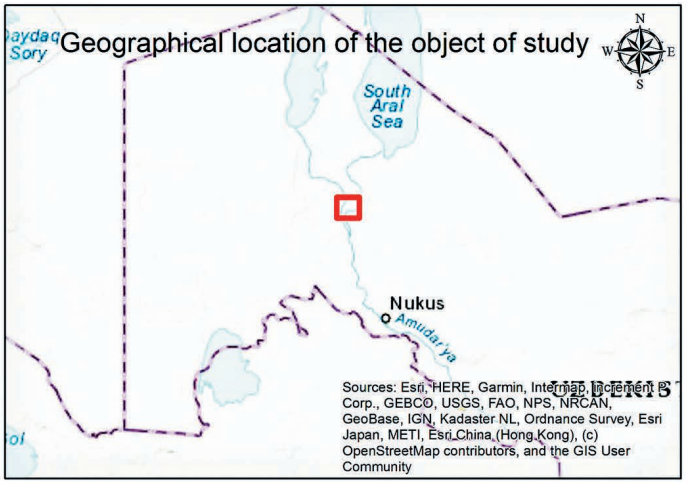
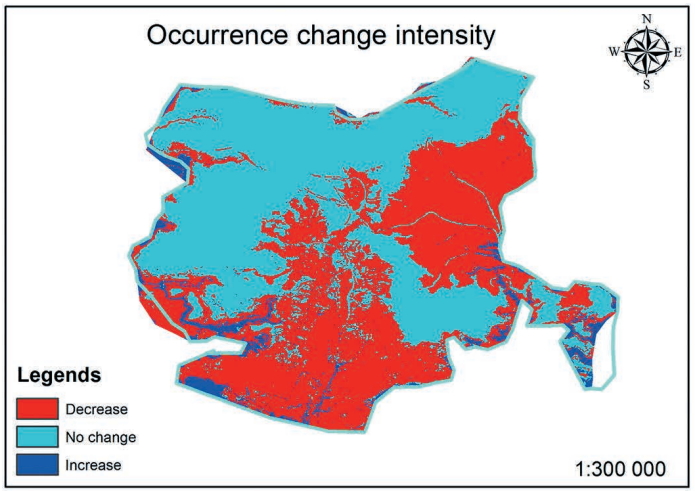


Рис. 2. Продолжение
Fig. 2. Continued.

в







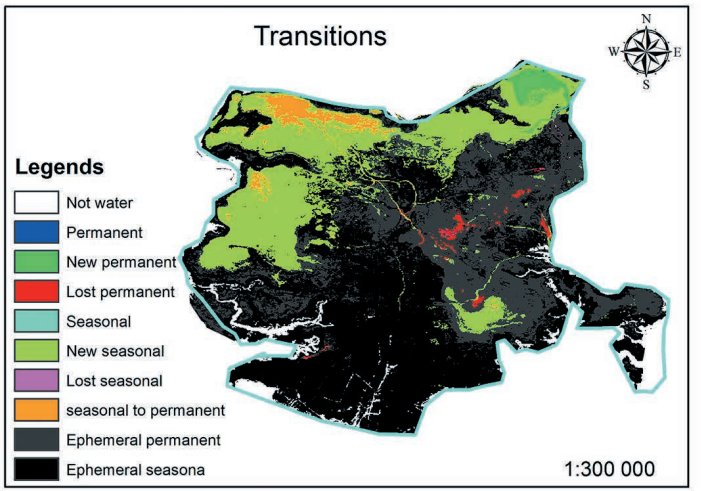


Рис. 2. Продолжение.
Fig. 2. Continued.

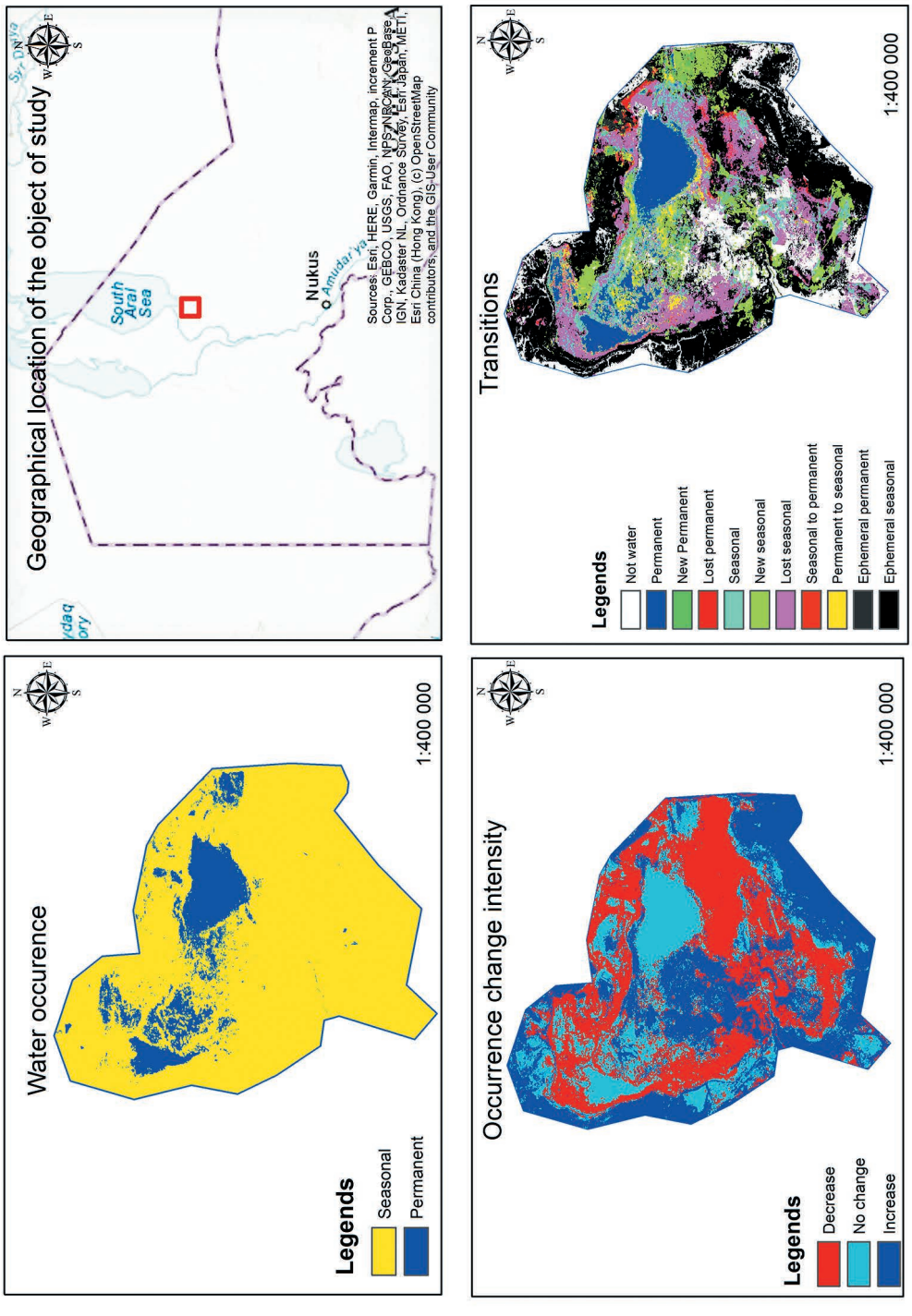
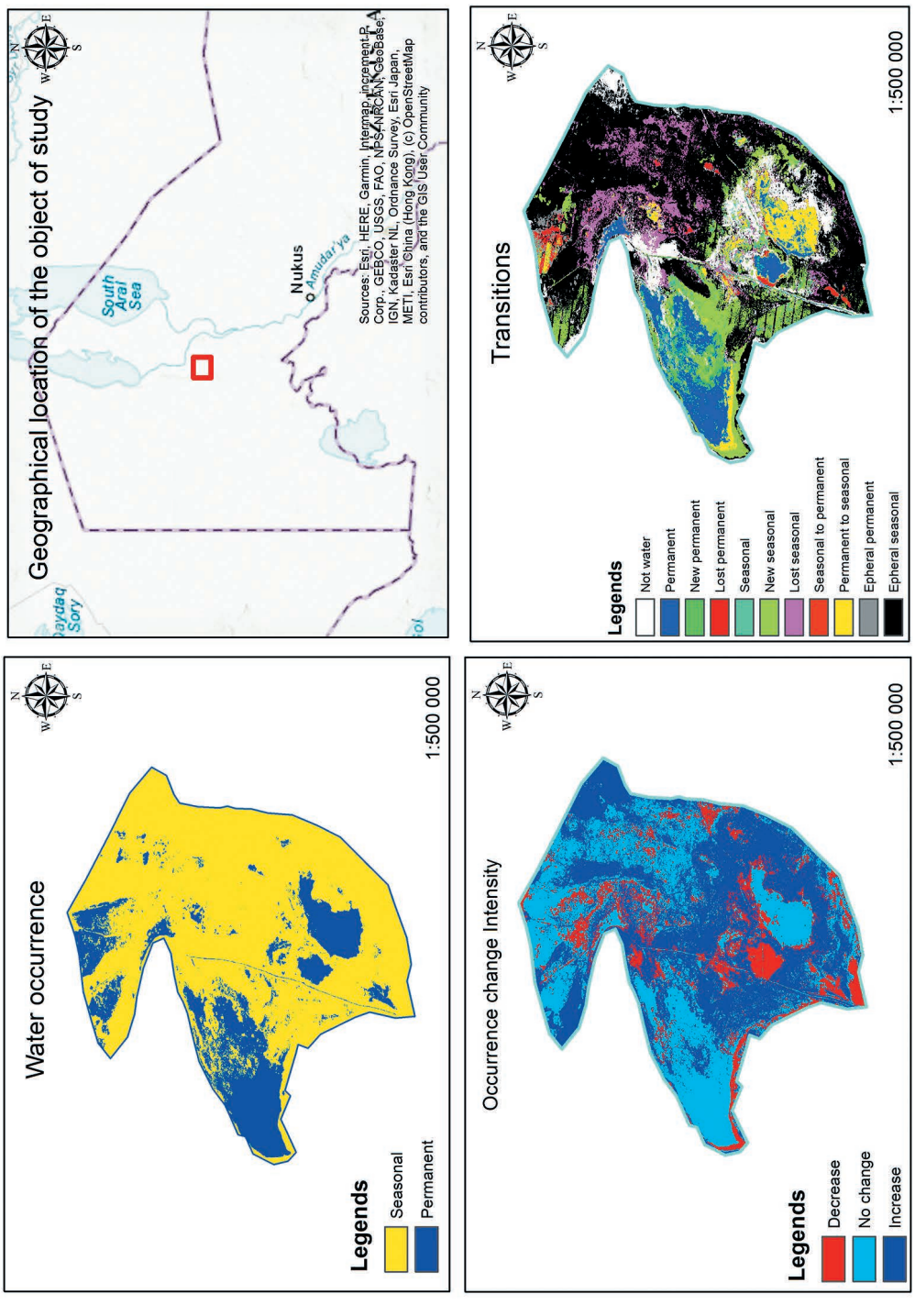


Рис. 2. Продолжение.
Fig. 2. Continued.



д

Рис. 2. Продолжение.
Fig. 2. Continued.

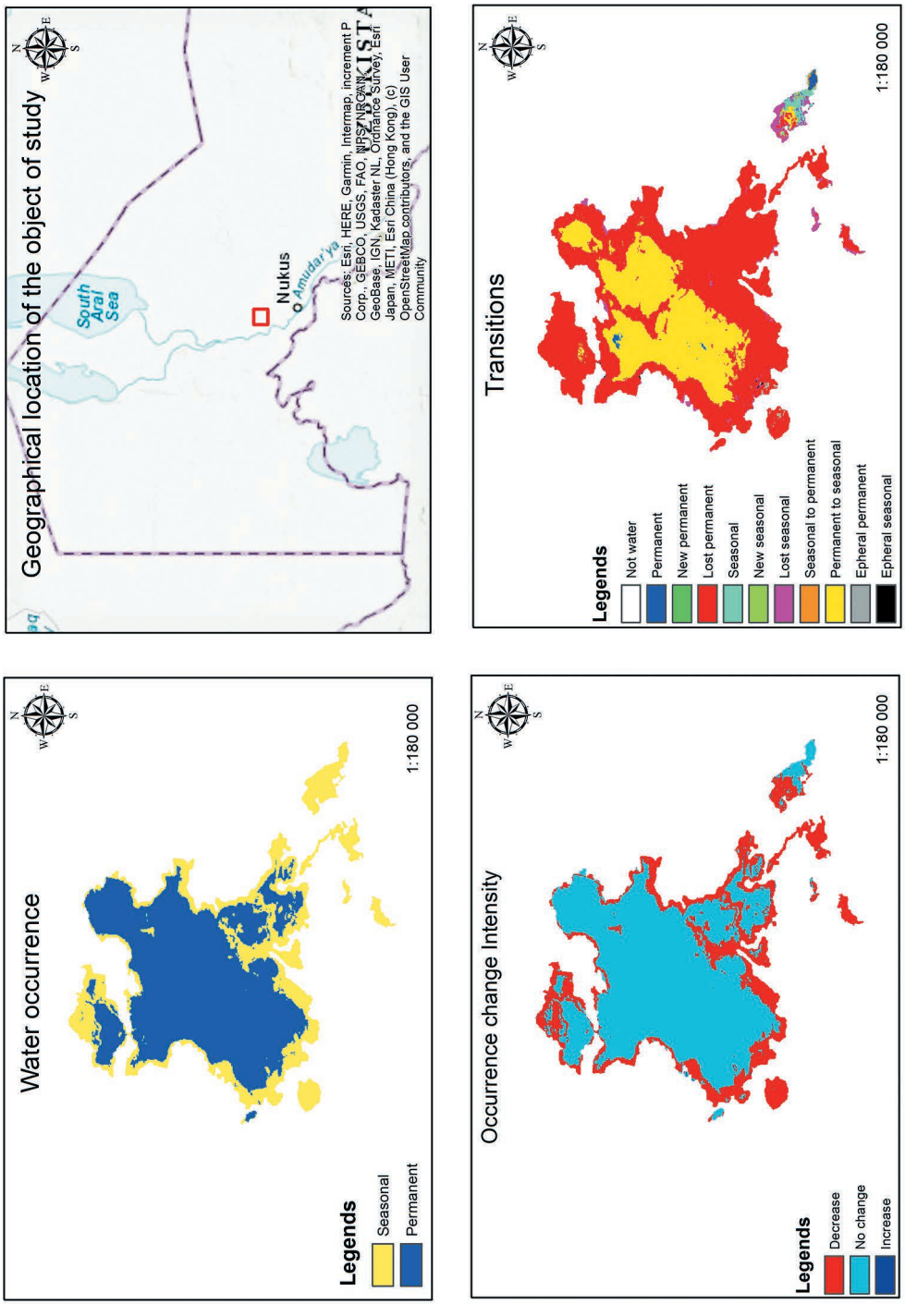


Рис. 2. Продолжение.
Fig. 2. Continued.

Таблица. Фазовые переходы озер Южного Приаралья*
Table. Phase transitions of lakes of the Southern Aral Sea region

Муйнак		Сарибас		Междуречье		Джылтырбас		Дауткул		Судочье	
Переходные фазы	Площадь, км^2	Переходные фазы	Площадь, км^2	Переходные фазы	Площадь, км^2	Переходные фазы	Площадь, км^2	Переходные фазы	Площадь, км^2	Переходные фазы	Площадь, км^2
Not water	7,35	Not water	0,32	Not water	15,8	Not water	80,01	Not water	0,008	Not water	85
Permanent	0,47	Permanent	0,35	Permanent	0,096	Permanent	42,74	Permanent	0,36	Permanent	63
New permanent	0,007	New seasonal	24,1	New permanent	3,94	New permanent	1,75	Lost permanent	49,9	New permanent	10
Lost permanent	3.39	Lost seasonal	0,003	Lost permanent	1,47	Lost permanent	6,95	Seasonal	0,77	Lost permanent	8
Seasonal	6,85	Ephemeral permanent	5,56	Seasonal	0,1	Seasonal	31,88	Lost seasonal	2,03	Seasonal	14
New seasonal	11,5	Ephemeral seasonal	8,8	New seasonal	61,55	New seasonal	42,58	Seasonal to permanent	0,11	New seasonal	84
Lost seasonal	21,51	-	-	Lost seasonal	0,16	Lost seasonal	80,3	Permanent to seasonal	24,9	Lost seasonal	67
Permanent to seasonal	2,45	-	-	Seasonal to permanent	5,95	Seasonal to permanent	0,09	Ephemeral permanent	0,8	Seasonal to permanent	0,27
Epheral permanent	12,4	-	-	Ephemeral l permanent	77,6	Permanent to seasonal	16,56	Ephemeral seasonal	0,03	Permanent to seasonal	35
Epheral seasonal	64,74	-	-	Ephemeral l seasonal	142,7	Ephemeral permanent	5,45	-	-	Ephermeal permanent	9
-	-	-	-	-	-	Ephemeral seasonal	164,38	-	-	Ephemeral seasonal	327

Примечание: * – классификации озер по фазам J.F. Pekel: 1. Not water – безводная, т. е. в течение изучаемого периода (1984–2021гг.) на космоснимках в этих зонах вода не отмечена (на карте рис. 2 обозначено белым цветом); 2. Permanent – на всех космоснимках (1984–2021 гг.) отмечена вода; 3. New permanent – изменившаяся к 2021 г. постоянная водная поверхность; 4. Lost permanent – до 2021 г. были постоянной водной поверхностью; 5. Seasonal – водная поверхность, возникающая в определенные сезоны года; 6. New seasonal – изменившаяся к 2021 г. сезонная водная поверхность; 7. Lost seasonal – ранее существовала в определенный сезон года, а теперь ее нет; 8. Seasonal to permanent – к 2021 г. водная поверхность стала постоянной, т. е. в течение всего года есть вода; 9. Permanent to seasonal – к 2021 г. водная поверхность стала сезонной; 10. Ephemeral permanent – в определенный период года постоянно есть вода; 11. Ephemeral seasonal – вода появляется в разные годы и в разные сезоны.

По результатам расчетов площадь постоянной водной поверхности в заливе Муйнак составляет 8,76 км^2, сезонная водная поверхность –121,9 км^2; в оз. Сарибас постоянная водная поверхность равна 27,7 км^2, сезонная водная поверхность – 11,4 км^2; в Междуречье постоянная водная поверхность составляет 109,05 км^2, сезонная водная поверхность – 200,5 км^2; в оз. Джылтырбас постоянная водная поверхность – 63,3 км^2, сезонная водная поверхность – 409,4 км^2; постоянная водная поверхность оз. Дауткуль – 48,44 км^2, сезонная водная поверхность – 29,9 км^2; в Судочье постоянная водная поверхность – 161 км^2, сезонная водная поверхность составила 544 км^2. Исследования показывают, что максимальный уровень воды в озерах наблюдался в 1992, 1998, 2010 годах.

Постоянная водная поверхность колебалась от 6,7 % до 71,02 % от общей площади озер. Эти значения были самыми высокими в оз. Сарибас (71,02 %), самые низкие – в заливе Муйнак (6,7 %). Из этого следует, что постоянные водные поверхности составляют небольшой процент, поскольку объем воды в озерах невелик и они быстро пересыхают в засушливые и жаркие сезоны.

При изучении изменений интенсивности распространения водной поверхности в заливе Муйнак за 32 года выявлено сокращение водной площади до 70,04 км^2, на площади 37,57 км^2 вода сохранилась. В оз. Сарибас эти значения уменьшились на 4,8 км^2, а площадь в 30,9 км^2 осталась неизменной; в Междуречье площадь воды уменьшилась на 140,05 км^2, осталось 152,6 км^2. В оз. Джылтырбас водная площадь уменьшилась на 173,13 км^2, сохранилось 126,2 км^2; в Дауткуле сократилась на 26,5 км^2, при этом 51 км^2 площади озера осталась неизменной; в Судочье водная поверхность сократилась на 89 км^2, 284 км^2 – без изменений.

При изучении переходных фаз Дж.Ф. Пекеля [3] выявлено, что 11 переходных фаз наблюдались не во всех исследованных озерах Южного Приаралья. Только озера Джылтырбас и Судочье имеют 11 переходных фаз, у залива Муйнак и оз. Междуречье – 10; в оз. Дауткуль было отмечено 9 переходных фаз, а в Сарибасе – 6 фаз (таблица).

В результате изучения переходных фаз озер Южного Приаралья установлено, что площадь постоянной фазы в озерах уменьшилась и, наоборот, выросла площадь эфемерно-постоянной и эфемерно-сезонной фаз.

ВЫВОДЫ

На основании анализа результатов, полученных в ходе данного исследования, были выработаны следующие выводы и научно обоснованные рекомендации.

С помощью «Системы долговременного мониторинга поверхностных вод» осуществлялся мониторинг водной поверхности озер за период 1984–2021 гг., разработаны карты «Распространение поверхностных вод в озере», «Интенсивность изменения распространения поверхностных вод в озере» и «Фазы перехода в озере».

По проведенным расчетам, за 32 года площадь исследуемых озер существенно сократилась, в том числе оз. Сарибас – на 29 %, оз. Междуречье – на 65 %, оз. Жылтырбас – 87%, оз. Дауткуль – 38 %, оз. Судочье – 77 %. Постоян-

ные водные поверхности залива Муйнак, озер Сарибас, Междуречье, Джылтырбас, Дауткул, Судочье составили 0,47 км^2, 0,35 км^2, 0,096 км^2, 42,74 км^2, 0,36 км^2 и 63 км^2 соответственно.

В результате исследований установлено, что залив Муйнак, озера Сарибас, Междуречье и Дауткуль становятся сезонными (весенними, летними) озерами. Показано, что озера Судочье и Жылтырбас имеют относительно стабильный гидрологический режим и могут удерживать воду в течение года, даже если нет нового притока.

Практическая значимость результатов проведенной работы определяется тем, что сделанные на их основе выводы и рекомендации, а также карты, составленные в результате исследований, помогают специалистам правильно размещать защитные объекты, строить и укреплять их, а также разрабатывать перспективные планы эксплуатации озер.

Вклад авторов. *Ф.Я. Артыкова – научное руководство, постановка задачи, подготовка текста, С.Б. Калабаев – сбор и обработка материалов, табличное и графическое представление результатов, анализ результатов, оформление.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wulder M.A. et al. Opening the archive: how free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat // Remote Sensing of Environment. 2012. No.122. P. 2–10. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010.
2. Najai A. & Vatanfada J. Environmental challenges in trans-boundary waters, case study: Hamoon Hirmand Wetland (Iran and Afghanistan) // International Journal of Water Resources and Arid Environments. 2011. No. 1. P. 16–24.
3. Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. Vol. 540. No. 7633. P. 418–422. https://doi.org/10.1038/nature20584.
4. Lutz A. F., Immerzeel W. W., Shrestha A. B. & Bierkens M. F. P. Consistent increase in High Asia's runof due to increasing glacier melt and precipitation // Nature and Climate Change. 2014. Vol. 4. P. 587–592. https://doi.org/ 10.1038/nclimate2237.
5. Kalabaev S.B., Yuldoshbaeva M.R. Kuyi Amudare suv obyektlarining gidrografic tavsifi // Uzbekiston Geografia zhamiyati Akhboroti. 2019. Vol. 56. P. 235–239.
6. Micklin P. The future Aral Sea: hope and despair // Environment Earth Science. 2016. Vol. 75. No. 844. P. 1–15. https://doi.org/10.1007/s12665-016-5614-5.
7. Adenbaev B.E., Kalabaev S.B. Hydrography, morphometry, and monitoring of the Lake Dzhyltyrbas current state // Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2023. No. 5. P. 43–53. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_5_4.
8. McFeeters S.K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features // International Journal of Remote Sensing. 1996. No. 17. 1425–1432 p. http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714.
9. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27. No. 14. P. 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.
10. Sun F. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2012. Vol. 33. No. 21. P. 6854–6875. https://doi.org/10.1080/01431161.2012.692829
11. Feyisa G.L. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2014. No. 140. P. 23–35. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029

12. Kurganovich K.A. Use of water indicies for assessment of the Transbaykal southeastern zone steppe soda lakeswater surface in accordance with the remote sensing data // The Transbaykal state university newsletter. 2015. No. 6 (121). P. 16–24.
13. Shmakova V.Y. Comparison of the lakes' morphometric charactersitics for different water indices // Collection of proceedings of XVII young researchers' conference «Fundamental and applied space reseaches». Ser. Mechanics, management, informatics. 2020. P. 161–169.
14. Morozova V.A. Indicies calculation for identification and analysis of water bodies' characteristics ith remote sensing data // Current problems of territoril development. 2019. No. 2. P. 1–12 (In Russ.).
15. Kalabaev S.B., Artykova F.Y. Sunyiy yuldosh kuzatuv maylumotlari buyicha kullarni kharitalash va monitoring kilish // Hydro/meteorology va atrof-mukhit monitoringi. 2024. No. 1. P. 87–92.
16. Artykova F.Y., Kalabaev S.B. Prospects ofthe satellite images' use for determination of the water level in larger lakes // Current problems of the Earth remote sensing from the space. 2024. No. 21(4). P. 251–259. https://doi.org/ 10.21046/2070-7401-2024-21-4-251-259.
17. Liu B. et al. Outburst looding of the moraine-dammed Zhuonai Lake on Tibetan plateau: causes and impacts // IEEE Geoscence Remote Sensing Letter. 2016. Vol. 13. P. 570–574. https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2525778
18. Markham B.L., Storey J.C., Williams D.L. & Irons J.R. Landsat sensor performance: history and current status // IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing. 2004. No. 42. P. 2691–2694. https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.840720

REFERENCES

1. Wulder, M. A. et al. Opening the archive: how free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*. 2012 Vol. 122. P. 2–10. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010
2. Najai, A. & Vatanfada, J. Environmental challenges in trans-boundary waters, case study: Hamoon Hirmand Wetland (Iran and Afghanistan). *Interantional Journal Water Resources. Arid Environonment*. 2011. Vol. 1. P. 16–24.
3. Pekel JF, Cottam A, Gorelick N, Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016. Vol. 540. No. 7633. P. 418–422. https://doi.org/10.1038/nature20584
4. Lutz, A. F., Immerzeel W. W., Shrestha A. B. & Bierkens M. F. P. Consistent increase in High Asia's runof due to increasing glacier melt and precipitation. *Natural Climate Changing*. 2014. Vol. 4. P. 587–592. https://doi.org/10.1038/nclimate2237
5. Kalabaev S.B., Yuldoshbaeva M.R. Quyi Amudaryo suv obektlarining gidrografik tavsifi *Hydrographic description of the lower Amudarya water bodies*. Ozbekiston Geografiya jamiyati. 2019. Vol. 56. P. 235–239 (In Uzbek).
6. Micklin, P. The future Aral Sea: hope and despair. *Environment Earth Science*. 2016. Vol. 75. No. 844. P. 1–15. https://doi.org/10.1007/s12665-016-5614-5
7. *Adenbaev B.E., Kalabaev S.B. Gidrografiya, morfometriya i monitoring sovremennogo sostoyaniya ozera Djiltirbas Hydrography, morphometry and monitoring of the current state of Lake Diltirvas. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 5. P. 43–53. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_5_4 (In Russ.).
8. McFeeters, S.K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17. P. 1425–1432. http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714
9. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27. No. 14. P. 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179
10. Sun F. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 33. No. 21. P. 6854–6875. https:// doi.org/10.1080/01431161.2012.692829
11. Feyisa G.L. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2014. No. 140. P. 23–35. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029

12. Kurganovich K.A. Using water indices to assess changes in the areas of water surfaces of steppe soda lakes in the south-east of Transbaikalia, based on remote sensing data. *Transbaykal state University newsletter*. 2015. Vol. 6. No. 121. P. 16–24 (In Russ.).
13. Shmakova V.Y. Comparison of morphometric characteristics of lakes for different water indices. *Proceedings of XVII Conference of young scientists "Fundamental and appled space researches". Series "Mechanics, Management, Informatics".* 2020. P. 161-169 (In Russ.).
14. Morozova V.ACalculation of indices for identification and analysis of water body characteristics using remote sensing data. *Current problems of territorial development* 2019. No. 2. P. 1–12 (In Russ.).
15. Kalabaev S.B., Artikova F.Y. Mapping and monitoring of lakes based on satellite observation data. *Hydrometeorology and environmental monitoring*. 2024. No. 1. P. 87–92 (In Uzbek).
16. Artikova F.Ya., Kalabaev S.B. Prospects for using satellite data to determine water levels in large lakes. *Current problems of the Earth remote sensing from the space*. 2024. No. 21(4). P. 251–259 Russia, Moscow, 2024. Vol. 21. No. 4. P. 251-259. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-4-251-259 (In Russ).
17. Liu, B. et al. Outburst looding of the moraine-dammed Zhuonai Lake on Tibetan plateau: causes and impacts. *IEEE Geoscience. Remote Sensing Letter*. 2016. Vol. 13. P. 570–574. https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2525778.
18. Markham, B. L., Storey, J. C., Williams, D. L. & Irons, J. R. Landsat sensor performance: history and current status. *IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing*. 2004. No. 42. P. 2691–2694. https:// doi.org/10.1109/TGRS.2004.840720.

Сведения об авторах:

Артыкова Фарида Якубовна, канд. геогр. наук, доцент кафедры гидрологии суши и метеорологии физического факультета Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Узбекистан, 100174, г. Ташкент, ул. Университетская, 4.

Калабаев Салауат Бахитбай ули, базовый докторант кафедры гидрологии суши и метеорологии физического факультета Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Узбекистан, 100174, г. Ташкент, ул. Университетская, 4; Scopus ID-59329867100; https://orcid.org/ 0000-0001-5188-7383; e-mail: salauat.kalabaev@gmail.com.

About the authors:

Farida Y. Artykova, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Land Hydrology and Meteorology, Faculty of Physics, Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan Mirzo Ulugbek, Uzbekistan, 100174, Tashkent, Universitetskaya St., 4.

Salauat B. Kalabaev, Basic Post-graduate Student, Department of Land Hydrology and Meteorology, Faculty of Physics, Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Uzbekistan, 100174, Tashkent, Universitetskaya St., 4; Scopus ID-59329867100; https://orcid.org/ 0000-0001-5188-7383; e-mail: salauat.kalabaev@gmail.com.

Поступила в редакцию / Received 21.02.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 01.03.2024.
Принята к публикации / Accepted 27.01.2025.

УДК: 551.345, 556 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-57-75*

Закономерности распространения наледей подземных вод, их связь с формированием речного стока и опасных явлений в Магаданской области

А.А. Землянскова[1,2], А.Н. Шихов[1,3], О.М. Макарьева[1,2], П.А. Никитина[1,4]

anastasiazemlanskova@gmail.com

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Россия*
[3]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия*
[4]*Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последнее десятилетие отмечается изменчивость процессов наледеобразования в различных природно-климатических условиях. Наледи оказывают большое влияние на инфраструктуру и могут приводить к существенному экономическому ущербу. В связи с активным освоением Магаданской области возникла потребность региональной оценки современного состояния и развития наледных процессов, в т. ч. их влияния на гидрологический режим рек и опасные природные явления. **Методы.** На основе анализа спутниковых снимков Landsat за период 2013–2019 гг. оценено количество и общая площадь наледей подземных вод на территории Магаданской области. Вклад наледного стока в речной сток в разные периоды гидрологического режима рассчитан по материалам 23 гидрологических постов. **Результаты.** На основе космических снимков 2013–2019 гг. разработан актуальный каталог наледей подземных вод Магаданской области. Проведен расчет, картирование и анализ закономерностей формирования наледных характеристик. Разработаны карты наледности Магаданской области, проведена оценка вклада наледного стока в сток рек частных водосборов р. Колымы и бассейнов рек Охотского моря в различные фазы гидрологического режима. Высокими значениями наледности отличаются бассейны рек Нелькоба, Берелех и Детрин, которые формируют «золотой пояс» и являются центром золотодобычи Магаданской области, что определяет необходимость их дальнейшего изучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Landsat, наледь, опасные явления, водные ресурсы, наледный сток, подземные воды, изменение климата, Магаданская область.

Финансирование: Работа выполнена в рамках НИР СПбГУ по теме «Разработка методики оперативного прогноза опасных гидрометеорологических явлений в условиях Дальневосточного федерального округа (на примере Магаданской области)» ID 116160863.

Для цитирования: Землянскова А.А., Шихов А.Н., Макарьева О.М., Никитина П.А. Закономерности распространения наледей подземных вод, их связь с формированием речного стока и опасных явлений в Магаданской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. №. С. 57–75. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-57-75, EDN: HCRGCT

© Землянскова А.А., Шихов А.Н., Макарьева О.М., Никитина П.А., 2025

The patterns of spring aufeis distribution, their relation with river runoff formation and hazardous phenomena in the Magadan region

Anastasia A. Zemlianskova[1,3] ✉, **Andrey N. Shikhov**[1,2], **Olga M. Makarieva**[1,3,4], **Polina A. Nikitina**[1,4]

✉ anastasiazemlanskova@gmail.com

[1]*Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*
[2]*Perm State University, Perm, Russia*
[3]*Northeastern State University, Magadan, Russia*
[4]*State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia*

ABSTRACT

Relevance. In the last decade, the variability of aufeis formation processes in various natural and climatic conditions has been noted. Aufeis has a great impact on infrastructure and can lead to significant economic damage. Due to the active development of the Magadan region, there is a need for a regional assessment of the current state and formation of aufeis processes, including their impact on the hydrological regime of rivers and natural hazards. **Methods.** Based on the analysis of Landsat satellite images for the period 2013–2019, the number (2 510) and total area (1 132.3 km^2) of spring aufeis in the Magadan region were estimated. The contribution of aufeis runoff to river streamflow in different periods of the hydrological regime was calculated based on the data of 23 hydrological gauges. **Results.** Based on the satellite images dated 2013–2019, we have developed an up-to-date catalog of the Magadan oblast groundwater aufeis. We have calculated, mapped and analyzed the regularities of the aufeis characteristics formation. The maps of aufeis state of Magadan oblast have been developed and the aufeis runoff contribution to the Kolyma River and the Okhotsk Sea basin rivers' runoff to the hydrological regime various phases. The Nelkoba, Berelekh and Detrin rivers' basins are characterized by the aufeis high values. These basins form the "golden belt" and are the Magadan oblast gold mining centers, so their further stdying is imperative.

KEYWORDS: Landsat, spring aufeis, hazards, water resources, aufeis runoff, groundwater, climate change, the Magadan region.

Financing: This study was supported by St. Petersburg State University within the project «Development of methodology for operational forecasting of hazardous hydrological events in the Far Eastern Federal District (using the Magadan Region as an example)» (ID PURE 116160863).

For citation: Zemlianskova A.A., Shikhov A.N., Makarieva O.M., Nikitina P.A. The patterns of spring aufeis distribution, their relation with river runoff formation and hazardous phenomena in the Magadan region. *Water Sector of Russia: Problems, technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 57–75. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-57-75, EDN: HCRGCT

ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата и антропогенное воздействие приводят к трансформации гидрологического цикла криолитозоны, включая изменения геокриологических условий, процессов водообмена подземных вод, формирования поверхностного стока. Наледи подземных вод регулируют поверхностный и подземный стоки, являются важнейшим элементом в цепи водообменных процессов зоны распространения мерзлоты [1, 2]. Из-за своих крупных раз-

меров они хорошо идентифицируются на космических снимках, что позволяет использовать наледи в качестве индикаторов происходящих изменений гидрологического и геокриологического режимов [3, 4]. Территория северо-востока является наименее изученной частью криолитозоны России, одновременно она характеризуется самым большим распространением гигантских наледей подземных вод [5, 6]. В свете планов по развитию регионов Дальнего Востока, в т. ч. добычи полезных ископаемых, исследование процессов формирования водных ресурсов и их режима является актуальной научной задачей.

Практическая значимость изучения наледей была показана еще в начале прошлого века. В 1920–1930-х годах началось активное освоение территории северо-востока в рамках развития горнодобывающей промышленности. Для обеспечения производственных работ были необходимы большие объемы воды. До работ Н.И. Толстихина, М.И. Сумгина, П.И. Мельникова, А.И. Ефимова существовало мнение о том, что повсеместное распространение мерзлых пород препятствует накоплению водных ресурсов в недрах земли [7]. Но активное развитие наледных процессов на территории криолитозоны свидетельствует об обратном. Уже в 1940-х годах различными исследователями была показана связь наледей с запасами подземных вод [8, 2].

Наледи включены в число самых опасных природных явлений России [9]. Опасность возникает не только зимой в процессе излияния, растекания и намораживания наледных вод, но и в теплый период года в результате разрушения наледного льда и развития сопутствующих мерзлотно-геологических и гидрологических явлений [9–11].

Магаданская область – один из регионов страны, где ущерб от наледей наблюдается каждый год. В 1960–1990-е годы для региона была разработана и реализовывалась программа по изучению наледей. В число обследованных участков вошли наледи рек Красноармейский, Уптар, Тенистый, Дукча, Ланковая, Бохапча, Дебин, Аян-Юрях, руч. Контактовый, руч. Чапчик и р. Анмангында[1]. В 1990-е годы все исследования в регионе прекратились.

В последнее десятилетие отмечается изменчивость процессов наледеобразования в различных природно-климатических условиях [1, 11–14], в т. ч. на северо-востоке России. В связи с активным освоением Магаданской области, богатой запасами стратегически значимых минеральных ресурсов[2], возникла потребность региональной оценки развития наледных процессов в современных условиях, их влияния на гидрологический режим рек.

Целью настоящего исследования является выявление закономерностей распространения и развития наледей подземных вод на территории Магаданской области, расчет наледных ресурсов региона и оценка их вклада в процессы формирования стока рек в современных климатических условиях.

[1] Колымское территориальное управление по гидрометеорологии и контролю природной среды. Отчет по наледным наблюдениям за зимний период 1981–1982 гг. Исп. – инженер отдела гидрологии Шубин В.С. Магадан, 1982. 57 с.

[2] Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Магаданской области на 15.09.2022, от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00), ФГБУ «ВСЕГЕИ».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Магаданская область расположена на северо-востоке России, площадь территории составляет 462 500 км^2. Горнодобывающая промышленность является основой экономики региона. Здесь сосредоточен значительный запас драгоценных металлов (золото, серебро), есть медь, вольфрам, молибден и др.

Территория преимущественно горная, абсолютные высоты Охотско-Колымского нагорья колеблются от 600 до 1 500 м, достигая 2 337 м. Прибрежная часть Охотского моря представляет собой невысокие низменности с холмистым рельефом. Климат горной части суровый, резко континентальный. На морских побережьях преобладает морской климат с мягкой зимой.

Речная сеть Магаданской области очень густа (0,82 км/км^2) и имеет сложный рисунок. Самой крупной рекой является р. Колыма, исток которой находится в месте слияния рек Кулу и Аян-Юрях, ее бассейн составляет 647 000 км^2. Притоки (реки Бахапча, Буюнда, Детрин, Дебин, Сеймчан, Тенька и др.), как и сама Колыма, относятся к бассейну Северного Ледовитого океана. Такие реки, как Яна, Армань, Яма, Гижига, Тауй и др., относятся к бассейну Тихого океана.

Наличие многолетнемерзлых пород является одним из основных факторов, влияющих на процессы формирования стока. Мерзлота препятствует свободному водообмену между подземными и поверхностными водами, способствует наледеобразованию, криогенному перераспределению стока и криогенным паводкам. Механизмы взаимодействия поверхностного и подземного стоков, водовмещающих пород и мерзлых отложений изменчивы в пространстве и во многом определяются ландшафтными характеристиками.

К геокриологическим явлениям, характерным для Магаданской области, относятся наледи. Наледи создают опасные ситуации для функционирования транспортных средств и инженерных сооружений (рис. 1). Так, в пос. Сокол на руч. Потерянный, который относится к бассейнам рек Охотского моря, наблюдалось давление наледи на трубопровод, а также подпор моста. В 2023 г. в пос. Ягодное на реке Дебин (левый приток Колымы) в весенний период произошел выход наледных вод, которые нанесли ущерб частному сектору.

Исходные данные о наледях

В исследовании использованы картографические базы данных о наледях, созданные в рамках работы над Атласом гигантских наледей-тарынов северо-востока России [7]. Исторические данные о наледях получены из кадастра и карты наледей 1958 г. А.С. Симакова и З.Г. Шильниковской [15, 16]. Эти материалы были оцифрованы и представлены в виде базы данных [17]. Современное местоположение и характеристики наледей определены по снимкам со спутников серии Landsat, полученным сразу после схода устойчивого снежного покрова. Всего обработано более 100 сцен Landsat, самая ранняя из выбранных дат съемки – 12 мая, самая поздняя – 30 июня. Актуальный каталог наледей для территории Магаданской области представлен в виде базы данных и картографического материала.

База данных содержит информацию о характеристиках наледей из исторических и современных источников. Все данные имеют систему координат



Рис. 1. Наледи как опасное явление в Магаданской области: *а* – природно-техногенная наледь под мостовым пролетом, пос. Сокол, 2021 г.; *б* – пос. Ягодное, 3 апреля 2023 г., выход наледных вод на территорию жилых сооружений.
Fig. 1. Aufeis is a hazardous phenomenon in the Magadan region. *a* – natural and man-made aufeis under the bridge span, Sokol 2021; *b* – Yagodnoye, 3th April, 2023, the outlet of aufeis waters to the territory of buildings.

WGS 1984 (без проекции). Проведена взаимная верификация данных спутникового мониторинга и материалов кадастра наледей (1958 г.). Она основана на определении соседних (ближайших) объектов между точечным слоем наледей (данные кадастра) и полигональным слоем (данные Landsat). Введены два критерия: максимальное расстояние между наледями из двух источников информации не должно превышать 5 км, объекты находятся в долине одного водотока или в пределах одной наледной поляны.

Уточнение площади наледей

Спутниковые снимки были отобраны за разные даты в период мая – июня, что обусловлено наличием в другое время года облачности или снежного покрова, затрудняющих дешифрирование наледей. В эти месяцы происходит наиболее активное разрушение ледяных полей под действием как солнечной радиации, так и водной эрозии. Крупные наледи могут потерять до 70 % своей площади и объема, маленькие – стаять полностью. Для компенсации фактора использования поздних снимков было проведено уточнение площади наледей, полученных по космическим снимкам, с целью приведения величин к максимальным значениям, наблюдаемым в период перед началом таяния. За основу был взят метод расчета уменьшения относительных значений площадей Анмангындинской наледи (2000–2022 гг.) в течение теплого периода

года в зависимости от числа дней после начала таяния для наледей площадью 0,6–23 км^2 [18]. Для уточнения площадей наледей меньше 0,6 км^2 использовалась кривая, рассчитанная Б.Л. Соколовым (1975 г.) [19].

Для определения дат начала таяния (перехода температуры воздуха через ноль градусов в сторону положительных значений, T_{+0}) наледи использовались данные ближайших метеорологических станций за год, на который был получен спутниковый снимок. Информация о температуре воздуха получена по 26 метеорологическим станциям, ряд наблюдений взят за период 2013–2019 гг.[3]. От даты наступления T_{+0} отсчитывали количество дней до даты спутникового снимка, на котором была дешифрирована наледь, а после с номограммы (рис. 2) снимали значение площади льда, выраженное в %.

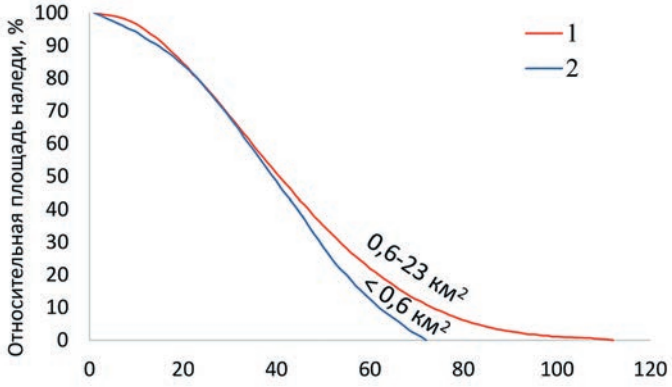


Рис. 2. Номограммы для определения относительной площади наледи подземных вод в зависимости от числа дней после начала ее таяния:
1 – кривая по материалам анализа площади Анмангындинской наледи за 2000–2022 гг.; 2 – кривая Б.Л. Соколова (1975 г.) [19].

Fig. 2. The aufeis area decrease during the warm period of the year, depending on the number of days after the start of ablation, and their maximum area (The numbers at the curves, km^2):
1 – the curves according to analyses of Anmangynda aufeis area from 2000 to 2022;
2 – the curves according to B.L. Sokolov, (1975).

Оценка наледных ресурсов и их вклада в речной сток

Впервые термин «наледные ресурсы» был предложен В.Р. Алексеевым [20]. В настоящей работе под этим термином подразумеваются суммарные запасы наледного льда, образующегося за конкретный период времени на какой-либо территории[4], который в процессе таяния вносит вклад в формирование речного стока.

На основе полученных данных о максимальной площади наледей и региональных коэффициентов $a = 0{,}364$, $n = 1{,}167$, определенных по материалам 1963–1990 гг. на Анмангындинской наледи, был выполнен расчет наледных ресурсов (объема льда, км^3) Магаданской области по методу Б.Л. Соколова (1975 г.) [19]:

[3] Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Св. о государств. регистрации базы данных № 2014620549. URL: http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных (дата обращения: 12.09.2024).
[4] Гляциологический словарь, 1984.

$$W = aS^n,$$

где W – объем льда (тыс. м^3), S – площадь льда, тыс. м^2, a, n – коэффициенты.

На основе долгосрочных данных о стоке рек по 23 гидрологическим постам с площадью бассейнов от 376 км^2 до 526 000 км^2, период наблюдений с 1941 по 2016 гг.[5], выполнен расчет годового стока, а также слоев стока за периоды зимней межени (октябрь – апрель) и весеннего половодья (май-июнь) по уточненным параметрам. Определение притока воды от наледей в реки Магаданской области в период весеннего половодья (май – июнь), рассчитывалось по номограммам р. Анмангында, где за 30 дней от начала таяния разрушается около 30 % объема льда. Для оценки годового наледного стока принималось, что наледь полностью разрушается и весь объем расходуется на питание реки. Для периода зимней межени определена доля стока, которая расходуется на формирование наледи. Слой наледного стока рассчитывался с учетом плотности льда 870 кг/м^3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Закономерности распространения наледей подземных вод в Магаданской области

В Магаданской области, по данным кадастра (1958 г.), формировалось 1 820 наледей с суммарной площадью наледных полян 1 686 км^2. Общее число наледей по современным снимкам Landsat (2013–2019 гг.) – 2 510, суммарная площадь на даты снимков составила 772,9 км^2. Они расположены на разных высотах практически от уровня моря (5–10 м) до 1 300 м, но большинство из них – в диапазоне 400–800 м (как и самые крупные наледи). Площадь учтенных наледей, по спутниковым снимкам Landsat, изменяется от 0,01 до 7,75 км^2, самая крупная наледь Магаданской области расположена в бассейне р. Ясачная – с. Нелемное (рис. 3). Сопоставление двух источников данных показало, что 890 наледей учтено по двум источникам информации, 929 объектов по спутниковым снимкам идентифицировать не удалось, а 780 – не указано в кадастре.

Для 2 405 наледей уточнена площадь до начала таяния с помощью номограмм для определения максимальных размеров. Продолжительность таяния в среднем составила 27 дней, для некоторых наледей – 57 сут. Самая ранняя дата начала таяния – 14 апреля. Суммарная уточненная площадь наледей составила 1 132,3 км^2, т. е. увеличилась на 349,7 км^2 или 44 % по сравнению с тем, что было получено в результате дешифрирования спутниковых снимков. Максимальный размер восстановленной наледи – 13,7 км^2 при исходной площади в 6,1 км^2.

Наледный пояс в бассейне р. Колымы формируется по всему периметру водоразделов как с бассейном р. Индигирки, так и с бассейнами рек Охотского моря и Чукотского полуострова. Наледность бассейнов рек Кулу и Аян-Юрях, формирующих р. Колымы, составляет 0,30 % и 0,41 % соответственно. Высокими значениями наледности отличаются бассейны рек верховьев Колымы – Нелькоба (0,83 %), Берелех (0,77 %) и Детрин (0,32–0,63 %). Бассейны этих рек

[5] Гидрологический ежегодник 1941–2016 гг.: Т. 2. Бассейны. 439 с.

формируют «золотой пояс» и являются центром золотодобычи Магаданской области. Из рек, берущих начало на Колымском нагорье, высокой наледностью отличаются р. Олой, правый приток р. Омолон (0,50 %), и р. Сугой, правый приток р. Колымы (0,48 %).

В бассейнах рек Охотского моря формируется 1 134 наледи общей площадью 424,2 км^2, большинство наледей имеют размеры менее 1 км^2. В центральной и нижней низменной части бассейна р. Колымы наледи не формируются.

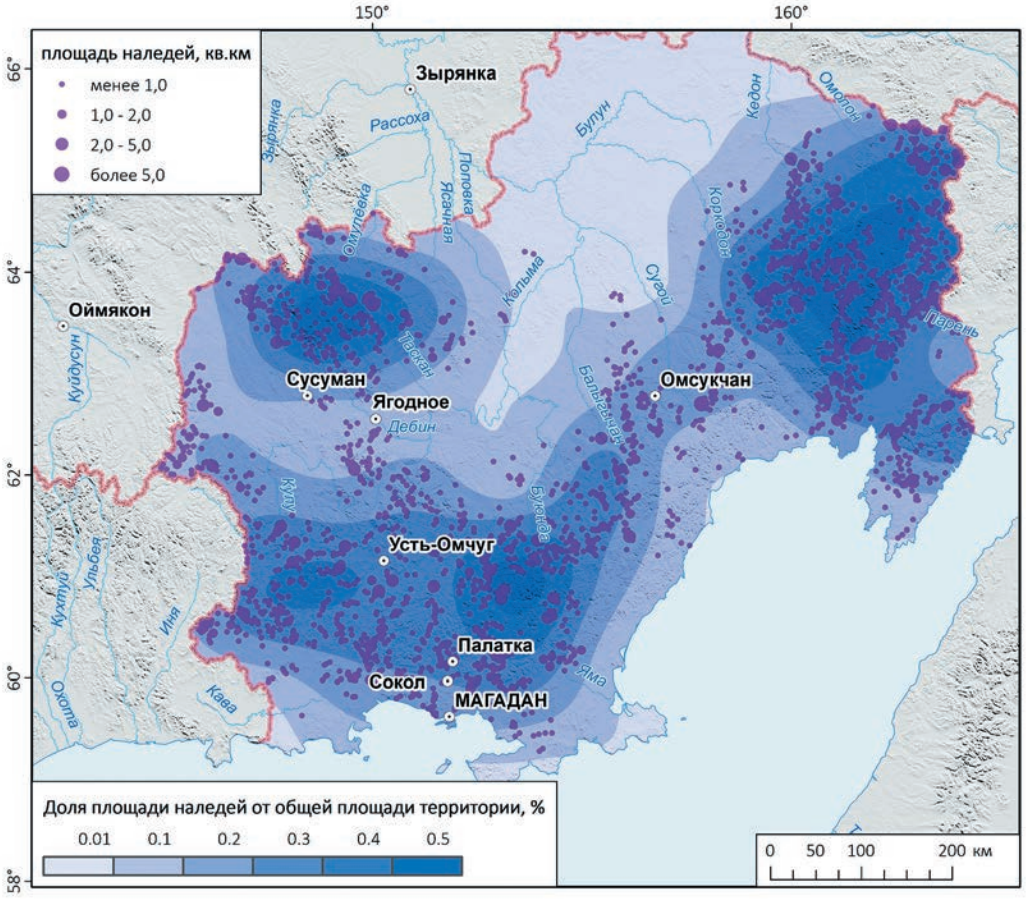


Рис. 3. Распространение наледей на территории Магаданской области по данным снимков Landsat.
Fig. 3. Spatial distribution of aufeis in the Magadan region according to Landsat images.

Оценка наледных ресурсов и их вклада в речной сток Магаданской области

На основе полученных данных рассчитан вклад наледного стока в водный баланс бассейнов рек Магаданской области в различные фазы гидрологического режима. Общие наледные ресурсы, по скорректированным данным Landsat, составляют 2,9 мм или 1,35 км^3. Средний многолетний годовой сток рек бассейна р. Колыма, протекающих по территории Магаданской об-

ласти, изменяется в пределах от 198 до 339 мм, при этом зимний сток (октябрь – апрель) составляет от 3,6 до 29,4 мм, а сток половодья (май – июнь) – от 79 до 165 мм (табл.). Запас воды в наледях может значительно превышать суммарный зимний сток рек. Так, отношение наледного стока к стоку рек за зимний период составляет 7–236 % (в среднем 37 %, максимум наблюдается на р. Берелех – пос. Переправа), что свидетельствует о наличии подземного питания (рис. 4).

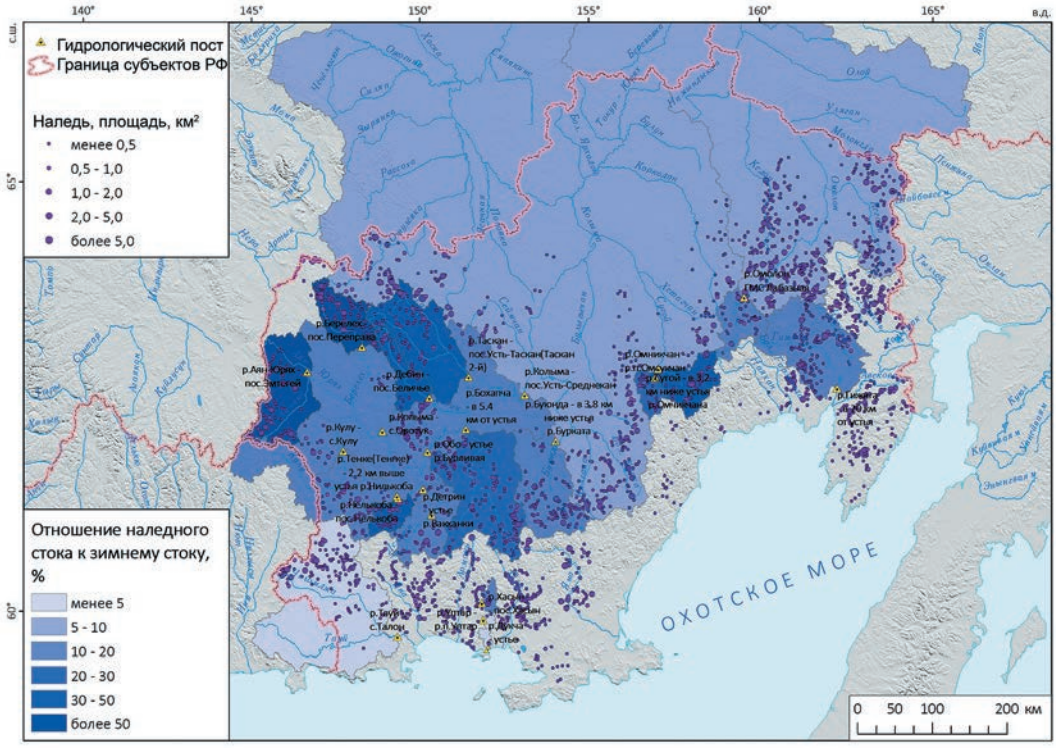


Рис. 4. Доля зимнего стока рек, изъятого на формирование наледей, %.
Fig. 4. The fraction of winter flow stored in the aufeis, %.

Доля наледного стока в период весеннего половодья (рис. 5) изменяется от 1 до 8,6 % (в среднем 2,7 %). Наибольший вклад наледей в речной сток в различные сезоны гидрологического цикла характерен для р. Берелех – пос. Переправа (4,0 % – годовой, 235,6 % – зимний, 8,6 % – весенний). Средний годовой наледный сток варьирует от 1,4 до 9,3 мм, что соответствует 0,7–14 % (в среднем 2,2 %) от годового речного стока (рис. 6).

Средний годовой сток рек, впадающих в Охотское море, составляет от 409 до 561 мм, в период весеннего половодья 197–231 мм, а в период зимней межени – 29–141 мм. Оценка вклада наледей в сток рек Охотского моря была проведена по данным пяти гидрологических постов. Наледность бассейна р. Хасын составила 0,51 %, а величина наледного стока 5,1 мм или 1,2 % годового стока реки (рис. 6).

Таблица. Вклад наледей в водный баланс рек Магаданской области
Table. Contribution of aufeis in water balance of river of the Magadan region

Код поста	Река – створ	F, км^2	H, мм	Hw, мм	Hs, мм	N	S, км^2	W, млн м^3	Z, %	H1, мм	P1, %	P2, %	P3, %
1001	р. Колыма – с. Оротук	42 600	228	9,4	92	186	118,6	148,5	0,28	3	1,3	32,3	2,6
1010	р. Колыма – пос. Усть-Среднекан	99 400	242	25,9	101	557	308,4	373,3	0,31	3,3	1,4	12,6	2,6
1024	р. Аян-Юрях – пос. Эмтегей	9 560	215	7,7	96	53	39,1	49,5	0,41	4,5	2,1	58,5	3,7
1050	р. Берелех – пос. Переправа	4 980	211	3,6	79	61	38,4	48,6	0,77	8,5	4	235,6	8,6
1095	р. Кулу – с. Кулу	10 300	293	17,7	127	47	31,1	39,4	0,3	3,3	1,1	18,8	2,1
1124	р. Тенке (Тенгке) – 2,2 км выше устья р. Нелькоба	1 820	257	9,1	128	9	3,4	3,6	0,19	1,7	0,7	19,1	1,2
1144	р. Нелькоба – пос. Нелькоба	2 110	339	19,7	165	20	17,6	22,6	0,83	9,3	2,7	47,3	4,5
1151	р. Детрин – устье р. Омчука	3 490	323	21,3	142	32	21,9	27,9	0,63	6,9	2,2	32,7	3,9
1152	р. Детрин – устье р. Вакханки	5 630	290	16,6	132	39	18,2	20,9	0,32	3,2	1,1	19,5	1,9
1176	р. Бохапча – в 5,4 км от устья	13 600	292	14,5	149	104	46,1	53,2	0,34	3,4	1,2	23,5	1,8
1194	р. Дебин – пос. Беличье	3 460	276	6,5	141	26	8,2	8,4	0,24	2,1	0,8	32,5	1,2
1238	р. Таскан – пос. Усть-Таскан (Таскан 2-й)	9 970	215	10,5	115	59	32,3	39,8	0,32	3,5	1,6	33,1	2,4
1293	р. Буюнда – в 3.8 км ниже устья р. Бурката	9 090	302	19,5	153	98	29,2	32,1	0,32	3,1	1	15,8	1,6

Продолжение таблицы
Continuation of the table

Код поста	Река – створ	F, км^2	H, мм	Hw, мм	Hs, мм	N	S, км^2	W, млн м^3	Z, %	H1, мм	P1, %	P2, %	P3, %
1341	р. Сугой – в 3,2 км ниже устья р. Омчикчан	5 880	304	17,5	157	37	28,5	40,9	0,48	6,1	1,9	34,7	3,1
1342	р. Омникчан – р.п.Омсукчан	1 720	293	18,8	136	29	9	9,2	0,52	4,7	1,6	24,9	2,8
1368	р. Омолон – ГМС Лабазная	3 710	314	29,4	128	39	18,6	21,5	0,5	5	1,6	17,1	3,2
1521	р. Гижига – в 20 км от устья	11 700	409	38,6	226	128	53,2	65,3	0,45	4,9	1,2	12,6	1,7
1556	р. Хасын – пос.Хасын	682	444	40,3	197	8	3,5	4	0,51	5,1	1,2	12,7	2,1
1566	р. Тауй – с.Талон	25 100	458	76	212	131	43,4	46,7	0,17	1,6	0,4	2,1	0,6
1597	р. Обо – устье р. Бурливая	664	299	13,4	139	16	2,7	2,4	0,41	3,1	1	23,3	1,9
1604	р. Анмангында – Тенькинская трасса, 159-й км	376	288	17,1	107	1	5,1	7,8	1,4	20,7	7,2	121,3	13,6
1801	р. Колыма – г. Среднеколымск	361 000	198	19,5	87	1085	555,9	682,4	0,15	1,6	0,8	8,4	1,6
1803	р. Колыма – гидроствор Колымское 1	526 000	199	20,2	85	1500	732,1	893,7	0,14	1,4	0,7	7,3	1,4

Примечание: F – площадь бассейна, H – средний многолетний годовой слой стока, H_w – слой зимнего стока (октябрь – апрель), H_s – слой стока половодья (май – июнь), N – количество наледей, S – восстановленная площадь наледей, W – объем наледей, рассчитанный по восстановленной площади, Z – наледность бассейна, H1 – наледные ресурсы, P1, P2 и P3 – наледные ресурсы в % от годового, зимнего стока рек и стока в период весеннего половодья.
F – basin area (km^2), H – long-term average annual runoff (mm), H_w – winter runoff (October – April) (mm), H_s – spring freshet runoff (May – June) (mm), N – number of aufeis fields, S – corrected aufeis area (km^2), W – aufeis resource (thous., m^3), Z – aufeis area share at the period of its maximum development (%), H1 – aufeis runoff (mm), P1, P2 and P3 – share of aufeis resources in the annual runoff, winter runoff and spring freshet runoff, respectively (%).

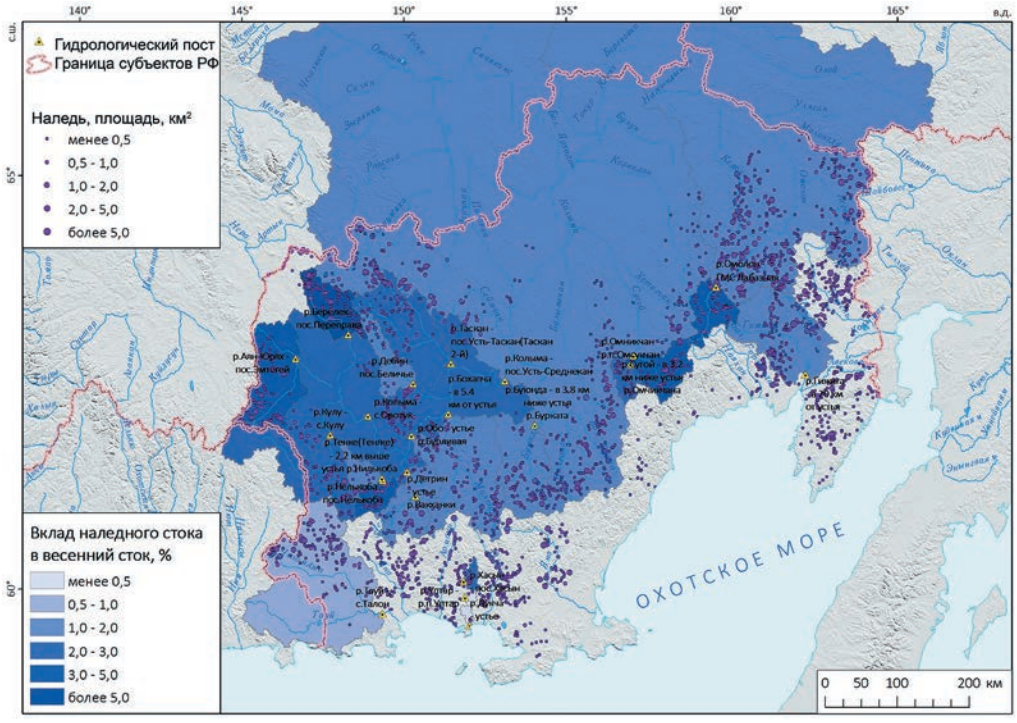


Рис. 5. Вклад наледного стока в сток рек в период весеннего половодья, %.
Fig. 5. Contribution of aufeis meltwater in spring freshet runoff, %.

Систематизация данных о распространении наледей и их характеристиках является первым и наиболее важным этапом изучения наледных явлений, а также планирования мероприятий инженерного освоения местности, периодически занимаемой наледным льдом. На основе данных карты и кадастра наледей северо-востока СССР [15, 16] в течение более чем 70 лет проводились исследования взаимосвязи между процессами наледеобразования и многолетней мерзлотой, рельефом, речной сетью и стоком ручьев, метеорологическими условиями и другими факторами. Эти материалы сыграли важную роль в оценке ресурсов подземных вод северо-востока [21]. Однако в последние десятилетия отмечается изменчивость процессов наледеобразования в различных природно-климатических условиях, связанная как с потеплением климата, так и с антропогенным воздействием [1, 11–13, 18]. В связи с этим формируются региональные базы данных распространения наледей в современном климате, например, в Канаде [1, 22], на Аляске [23], в Западном Китае [3] и Индии [24], Монголии [25], Забайкалье [10, 26].

В России в последние годы наблюдается активизация процессов наледеобразования, например, в Забайкальском крае наледи наносят значительный ущерб инфраструктуре и объектам экономики [10, 26].

В комплекс опасных процессов и явлений входят: затопление и подтопление территории в условиях отрицательных температур воздуха, статическое и динамическое давление льда, его пучение, обрушение, осадка, надвиги и

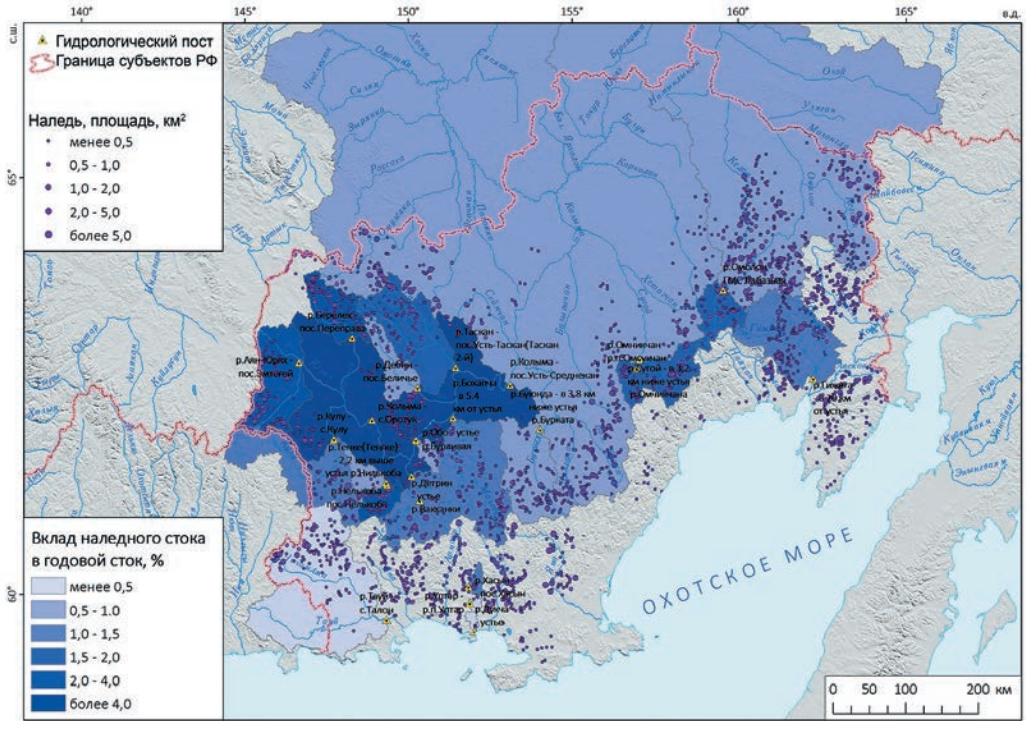


Рис. 6. Вклад наледного стока в годовой сток рек, %.
Fig. 6. Contribution of aufeis flow in mean annual river runoff, %.

сползание; образование ледовых плотин и барьеров, непредвиденных каналов стока; закупорка водопропускных труб и мостовых пролетов; формирование бугров и площадей пучения, пластов и линз подземного льда, термокарста и термоэрозии и пр. Основные инженерные проблемы связаны с обеспечением устойчивости и долговечности зданий, сооружений и коммуникаций в условиях активного наледеобразования.

В настоящее время активное изучение наледей ведется на трассе ФАД «Лена» от Невера до Томтора с применением спутниковых снимков, георадиолокационной съемки и полевых обследований. Результаты, полученные в 2021 г., свидетельствуют о том, что площади естественных наледей увеличились в размерах после строительства дороги, также наблюдается рост числа наледей [27].

В Магаданской области ежегодно проводятся противоналедные работы (рис. 7), часто уже после причинения ущерба инфраструктуре. Особо опасны наледи, которые выходят на дорогу или образуются под мостами (рис. 1), закупоривают водопропускные трубы. Ежегодное формирование – разрушение наледей приводит к износу мостовых опор. Так, на руч. Михалыч Магаданской области осенью 2023 г. (федеральная трасса Р504 «Колыма») мост был закрыт и сделан объезд, что привело к увеличению стоимости грузоперевозок. В 2022 г. мероприятия по очистке дорожного полотна от наледи были выполнены по трассе Палатка – Кулу – Нексикан, межмуниципальным дорогам Магадан –

Балаганное – Талон и Герба – Омсукчан. На федеральной трасе «Колыма» наледь вышла на обочину и проезжую часть, а также создала давление в подмостовой зоне. На некоторых участках трассы, а также на ледовой переправе через р. Яна проезд приостанавливался на время устранения наледного льда.

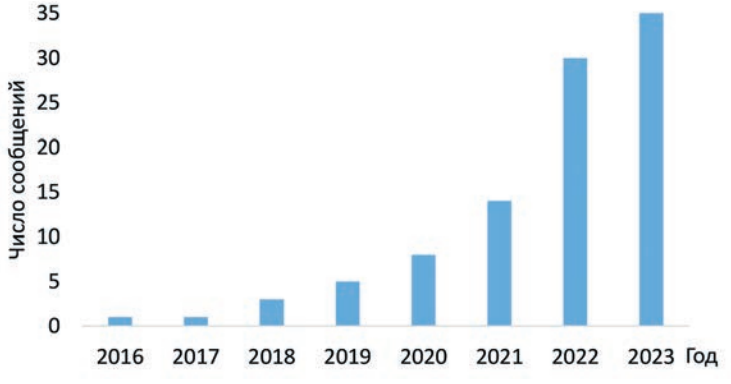


Рис. 7. Число сообщений о борьбе с наледями в Магаданской области.[6]
Fig. 7. Number of aufeis damage reports in the Magadan region.

Часто весной наледный сток формируется раньше, чем вскрывается русло реки. Это явление регулярно отмечается на территории Магаданской области, когда талые наледные воды текут поверх речного льда, что приводит к подтоплению населенных пунктов, жилых домов и дорог. В пос. Ягодное (Ягоднинский район Магаданской области) в апреле 2023 г. наблюдался резкий выход наледных вод на поверхность льда (рис. 1), а также их фильтрация через снежную толщу, что способствовало их выходу за пределы русла реки Дебин. Данное явление могло возникнуть из-за кратковременной оттепели, наблюдавшейся 31 марта, когда средняя температура воздуха составила +0,2 °С, а максимальная +2,7 °С, которая сменилась резким похолоданием: 3 апреля (дата разлива наледных вод) минимальная температура воздуха составила –26,3 °С.

Представленные факты указывают на то, что наблюдающееся изменение климата оказывает влияние на развитие наледных процессов, поэтому их изучение необходимо не только с фундаментальной точки зрения, но и с практической.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе космических снимков 2013–2019 гг. разработан актуальный каталог наледей подземных вод Магаданской области. Всего выявлено 2 510 наледей общей площадью 1 132,3 км^2, из которых 278 относятся к гигантским, т. е. имеют площадь свыше 1 км^2. Выявлены расхождения современных данных и данных кадастра наледей северо-востока страны (1958 г.). Проведен расчет, картирование и анализ закономерностей формирования наледных характеристик. К бассейну р. Колыма относятся 1 504 наледи с суммарной площадью 744,6 км^2, к бассейну р. Индигирка – 15, а к бассейнам рек Охотского моря – 991 наледь.

[6] https://mintrans.49gov.ru/

Разработаны карты наледности Магаданской области, проведена оценка вклада наледного стока в сток рек частных водосборов р. Колымы и бассейнов рек Охотского моря в различные фазы гидрологического режима. В годовом стоке рек наледный сток составляет от 1,4 до 20,7 мм или 0,4 и 14 %. В период весеннего половодья доля наледного стока в среднем составляет 2,8 %, а в зимний период – 33 % речного стока изымается на формирование наледей. На примере бассейна р. Анмангында доля наледного стока составляет 14 % в годовом стоке реки и до 30 % в период весеннего половодья.

Теоретическая значимость работы состоит в изучении механизмов взаимодействия подземных и поверхностных вод в горной криолитозоне в современном климате, а также актуализации сведений кадастра наледей, выпущенного в 1958 г., о распространении и характеристиках наледей Магаданской области. Практический эффект заключается в возможности использования актуальных данных о распространении наледей для прогноза опасных природных явлений, к которым относятся как сами наледи, так и неблагоприятные для многих отраслей хозяйства фазы водного режима – половодье, паводки и др. Результаты исследования могут быть использованы при организации эффективной деятельности дорожного хозяйства, предприятий и организаций Магаданской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morse P., Wolfe S. Long-Term River icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canadian Shield: River icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2016. No. 28. P. 580–586. https://doi.org/10.1002/ppp.1907
2. Швецов П.Ф. Роль вечной мерзлоты и подмерзлотных вод в гидрологии бассейнов рек Индигирки и Яны // Известия. АН СССР. Сер. Геология. 1946. № 6. С. 137–152.
3. Gagarin L., Wu Q., Cao W., Jiang G. Icings of the Kunlun Mountains on the Northern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau, Western China: Origins, Hydrology and Distribution // Water. 2022. No. 14. P. 2396. https://doi.org/10.3390/w14152396
4. Ensom T.P., Makarieva O.M., Morse P.D., Kane D.L., Alekseev V.R., Marsh P. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. No. 31. P. 383–395. https://doi.org/10.1002/ppp.2051
5. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды северо-востока СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.
6. Makarieva O., Zemlianskova A., Abramov D., Nesterova N., Ostashov A. Geocryological Conditions of Small Mountain Catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia) // Geosciences. 2024. Vol. 14. No. 4. P. 88.
7. Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Землянскова А.А. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России. Новосибирск: СО РАН, 2021. 302 с.
8. Калабин А.И. Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР. Магадан: Труды ВНИИ-1, Мерзлотоведение, 1960. Т. XVIII. 469 с.
9. Афанасенко В.Е., Булдович С.Н., Гарагуля Л.С., Оспенников Е.Н. Опыт проведения инженерно-геокриологического мониторинга на Байкало-Амурской магистрали и на участках обустройства газовых месторождений на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2000. Т. IV. № 2. С. 15–23.
10. Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Содномов Б.В., Батоцыренов Э.А. Наледи в степях западного Забайкалья // Вопросы степеведения. 2022. № 3. С. 4–11.
11. Алексеев В.Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лёд и снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 73–93.

12. Makarieva O., Nesterova N., Post D. A., Sherstyukov A., Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // The Cryosphere. 2019. No. 13. P. 1635–1659. https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019.
13. Crites H., Kokeji S., Lacelle D. Icings and groundwater conditions in permafrost catchments of northwestern Canada // Scientific Reports. 2020. No. 10. P. 3283. https://doi.org/10.1038/s41598-020-60322-w.
14. Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока рек высокогорной криолитозоны Восточной Сибири (на примере хребта Сунтар-Хаята) // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 178–186.
15. Симаков А.С., Шильниковская З.Г. Карта наледей Северо-Востока СССР. Краткая объяснительная записка. Магадан: Северо-Восточное геологическое управление Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров РСФСР, 1958. 40 с.
16. Шильниковская З.Г. Кадастр к Карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1:2 000 000. Магадан: Северо-Восточное территориальное геологическое управление, Центральная комплексная тематическая экспедиция, 1958. 398 с.
17. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В., Землянскова А.А., Алексеев В.Р. Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Колыма: опубл. 26.02.2021/ заявитель ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620332.
18. Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Лед и снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 71–84. https://doi.org/10.31857/S2076673423010167.
19. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 190 с.
20. Алексеев В.Р. Ландшафтная индикация наледных явлений. Новосибирск: Наука, 2005. 364 с.
21. Зуев И.А., Глотова Л.П., Зеленкевич А.А. Гидрогеология СССР. Т. 26. Северо-Восток СССР. Москва: Недра, 1972. 297 с.
22. Clark I., Lauriol B. Aufeis of the Firth River Basin, Northern Yukon, Canada: Insights into Permafrost Hydrogeology and Karst // Arctic and Alpine Research. 1997. Vol. 29. No. 2. P. 240–252. https://doi.org/10.2307/1552053.
23. Yoshikawa K., Hinzman L., Kane D. Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. No. G4. https://doi.org/10.1029/2006JG000294
24. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Spatial and temporal dynamics of aufeis in the Tso Moriri basin, eastern Ladakh, India // Permafrost and Periglacial Processes. 2022. Vol. 34. No. 1. P. 81–93. https://doi.org/10.1002/ppp.2173.
25. Chernykh V., Ayurzhanaev A., Sodnomov B., Garmaev E., Tsydypov B., Shikhov A., Zharnikova M., Gurzhapov B., Suprunenko A., Dashtseren A. Distribution Of Icings In The Northern (Russian) Part Of The Selenga River Basin And Their Role In The Functioning Of Ecosystems And Impact On Settlements // Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 1. No. 16. P. 150–156. https://DOI-10.24057/2071-9388-2022-052.
26. Звягинцев В.В., Звягинцева О.Ю. Динамика образования наледи в условиях Восточного Забайкалья: исследование с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28. № 7. С. 17–25. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-17-25.
27. Баишев Н.Е., Шепёлев В.В., Гагарин Л.А. О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360 «Лена» по данным мультиспектральных космических снимков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 1. С. 60–69. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-6.

REFERENCES

1. Morse P., Wolfe S. Long-Term River icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canadian Shield: River icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. Vol. 28. P. 580–586. https://doi.org/10.1002/ppp.1907
2. Shvetsov P.F. The role of permafrost and frozen waters in the hydrology of the Indigirka and Yana River basins. *USSR Academy of Sciences. Geology*. 1946. No 6. P. 137–152.

3. Gagarin L., Wu Q., Cao W., Jiang G. Icings of the Kunlun Mountains on the Northern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau, Western China: Origins, Hydrology and Distribution. *Water*. 2022. No. 14. 2396. https://doi.org/10.3390/w14152396
4. Ensom T.P., Makarieva O.M., Morse P.D., Kane D.L., Alekseev V.R., Marsh P. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020. No. 31. P. 383–395. https://doi.org/10.1002/ppp.2051
5. Tolstikhin O.N. Aufeis and Underground Water in the North-Eastern Regions of the USSR. Novosibirsk: Nauka, 1970, 164 p. (In Russ.).
6. Makarieva O., Zemlianskova A., Abramov D., Nesterova N., Ostashov A. Geocryological Conditions of Small Mountain Catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia). *Geosciences*. 2024. Vol. 14. No. 4. P. 88.
7. Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlyanskova A.A. Atlas of Giant Aufeis-Taryn of the North-East of Russia. Novosibirsk: SB RAS, 2021, 302 p.
8. Kalabin A.I. Permafrost and hydrogeology of the Northeast of the USSR. Magadan: Proceedings of the Research Institute-1, Permafrost Studies, 1960. Vol. XVIII. 472 p. (In Russ.).
9. Afanasenko V.E., Buldovich S.N., Garagulya L.S., Ospennikov E.N. Experience of monitoring along the Baikal-Amur railway and at construction sites within gas fields in the Northern part of West Siberia. *Kriosphera Zemli*. 2000. Vol. IV. No. 2. P. 15–23. (In Russ.).
10. Chernykh V., Ayurzhanaev A., Sodnomov B., Batotsyrenov E., Suprunenko A. Icing flood the steppes of Western Transbaikal. *Steppe science*. 2022. No. 3. P. 4–11 (In Russ.).
11. Alekseev V.R. Long-term variability of the spring taryn-aufeises. *Ice and Snow*. 2016. Vol. 56. No. 1. P. 73–92 (In Russ.) https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92
12. Makarieva O., Nesterova N., Post D.A., Sherstyukov A., Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. *The Cryosphere*. 2019. No. 13. P. 1635–1659. https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019
13. Crites H., Kokeji S., Lacelle D. Icings and groundwater conditions in permafrost catchments of northwestern Canada. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 3283. https://doi.org/10.1038/s41598-020-60322-w
14. Makarieva O.M., Nesterova N.V., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A. Modeling runoff formation processes in the high-mountain permafrost zone of Eastern Siberia (a case study of the Suntar-Khayata Range). *Geography and Natural Resources*. 2019. No. 1. P. 178–186. (In Russ.). https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2019-1(178-186)
15. Simakov A.S., Shilnikovskaya Z.G. Map of aufeis in the North-East of the USSR. A brief explanatory note. Northeastern Geological Department of the Main Department of Geology and Subsoil Protection under the Council of Ministers of the RSFSR. Magadan. 1958. 40 p. (In Russ.).
16. Shilnikovskaya Z.G. Cadastre to the 1: 2 000 000 scale map of the aufeis of the North-East of the USSR, compiled by A.S. Simakov and Z.G. Shilnikovskaya. Magadan, Northeastern Territorial Geological Department, Central Complex Thematic Expedition. 1958. 398 p. (In Russ.).
17. Certificate of state registration of the database No.2021620332 (dated 02.26.2021b). Aufeis of the Northeast of Russia: GIS catalog for the Kolyma River basin. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Zemlyanskova A.A., Alekseev V.R. (In Russ.).
18. Zemlianskova A.A., Alekseev V.R., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Makarieva O.M. Long-term dynamics of the huge Anmangynda aufeis in the North-East of Russia (1962–2021). *Ice and Snow*. 2023. Vol. 63. No. 1. P. 71–84 (In Russ.).
19. Sokolov B.L. Aufeis and river runoff. Gidrometeoizdat: Leningrad, 1975, 190 p. (In Russ.).
20. Alekseev V.R. Landscape indication of aufeis phenomena. Novosibirsk: Siberian Branch of Nauka Publishing House, 2005, 364 p. (In Russ.).
21. Zuev I.A., Glotova L.P., Zelenkevich A.A. Hydrogeology of the USSR. Edited by O.N. Tolstikhin. Moscow: Nedra, 1972. Vol. 26: Northeast of the USSR, 297 p. (In Russ.).
22. Clark I., Lauriol B. Aufeis of the Firth River Basin, Northern Yukon, Canada: Insights into Permafrost Hydrogeology and Karst. *Arctic and Alpine Research*. 1997. P. 29. https://doi.org/10.2307/1552053.
23. Yoshikawa K., Hinzman L., Kane D. Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska. *Journal of Geophysical Research*. 2007. Vol. 112. P. G04S43. https://doi.org/10.1029/2006JG000294

24. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Spatial and temporal dynamics of aufeis in the Tso Moriri basin, eastern Ladakh, India. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2022. P. 34. 10.1002/ppp.2173. https://doi.org/10.1002/ppp.2173.
25. Chernykh V.N., Ayurzhanaev A.A., Sodnomov B.V., Garmaev E.Zh., Tsydypov B.Z., Shikhov A.N., Zharnikova M.A., Gurzhapov B.O., Suprunenko A.G., Dashtseren A. Distribution of icings in the Northern (Russian) part of the Selenga River basin and their role in the functioning of ecosystems and impact on settlements. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023. Vol. 1. No. 16. P. 150–156. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-052
26. Zvyagintsev V., Zvyagintseva O. Investigation of the ice formation dynamics under the conditions of Eastern Transbaikalia Territory using Earth remote sensing data. *TransBaykal State University Journal*. 2022. Vol. 28. No. 7. P. 17–25. https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-7-17-25 (In Russ.).
27. Baishev N.E., Shepelev V.V., Gagarin L.A. Patterns of aufeis distribution along the Lena Highway according to multispectral satellite images. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021. Vol. 26. No. 1. P. 60–69 (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-6.

Сведения об авторах:

Землянскова Анастасия Александровна, канд. техн. наук, младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9; м. н. с., ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет», Россия, 685000, Магадан, ул. Портовая, 13; https://orcid.org/0000-0002-2249-5708; e-mail: anastasiazemlanskova@gmail.com

Шихов Андрей Николаевич, д-р. геогр. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9; ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Россия, 614068, Пермь, ул. Букирева, 15; https://orcid.org/0000-0003-2489-8436; e-mail: and3131@inbox.ru

Макарьева Ольга Михайловна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9; ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет», Россия, 685000, Магадан, ул. Портовая, 13; https://orcid.org/ 0000-0002-2532-4306**;** e-mail: omakarieva@yandex.ru

Никитина Полина Андреевна, лаборант–исследователь, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9; аспирант, Государственный гидрологический институт, Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; https://orcid.org/0000-0003-2439-2291; e-mail: nikitinapolina243@gmail.com

About the authors:

Anastasiia A. Zemlianskova, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, North-Eastern State University, 68500, Magadan, Portovaya str., 13; Junior Researcher, St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya Embankment, 7–9; https://orcid.org/0000-0002-2249-5708; e-mail: anastasiazemlanskova@gmail.com

Olga M. Makarieva, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, North-Eastern State University, 68500, Magadan, Portovaya str., 13; Leading Researcher, St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya Embankment, 7-9; Leading Researcher, State Hydrological Institute, 199053, St.Petersburg, 2-nd Line V.O., 23; https://orcid.org/ 0000-0002-2532-4306, omakarieva@yandex.ru

Andrey N. Shikhov, Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Perm State National Research University, 614068, Perm, Bukireva str., 15; Leading Researcher, St.

Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya Embankment, 7-9; https://orcid.org/ 0000-0003-2489-8436; e-mail: and3131@inbox.ru

Polina A. Nikitina, Laboratory Researcher, St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya Embankment, 7-9; postgraduate, State Hydrological Institute, 199053, St. Petersburg, 2-nd Line V.O., 23; https://orcid.org/ 0000-0003-2439-2291, nikitinapolina243@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 25.10.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 06.12.2024.
Принята к публикации / Accepted 27.01.2025.

УДК 556.53:504.064.36 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99*

Оценка допустимого отбора речных вод пойменными рыбхозами Белорусского Полесья

А.А. Волчек ✉, Д.Н. Дашкевич, М.Ф. Кухаревич, С.И. Парфомук, С.В. Сидак, Н.Н. Шешко, Н.Н. Шпендик

✉ volchak@tut.by

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье представлены результаты комплексного исследования влияния рыбхозов, расположенных в поймах рек Белорусского Полесья, на речной сток. Выполнены расчеты гидрологических характеристик для створов выше и ниже участков изъятия воды, построены поперечные профили. Определены минимальные среднемесячные расходы воды 95 % вероятности превышения и экологический сток с учетом внутригодового распределения стока различной обеспеченности. **Методы.** В проведенном исследовании применены математический метод, метод моделирования, геоэкологический метод, сравнительно-описательный метод, гидрологический анализ рисков. **Результаты.** Построены математические модели для участков рек, позволяющие определить скорости течения и расходы воды в зависимости от средней глубины воды в створе, а также объемы допустимого изъятия воды из рек, используемых для нужд рыбхозов при обеспечении условия сохранения экологического стока. На основании оперативных гидравлических расчетов получены оценки воздействия изъятия воды на изменение гидрологического режима водных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Белорусское Полесье, водность года, обеспеченность, пойма, профиль, створ, расход воды, рыбхоз, уровень, экологический сток.

Для цитирования: Волчек А.А., Дашкевич Д.Н., Кухаревич М.Ф., Парфомук С.И., Сидак С.В., Шешко Н.Н., Шпендик Н.Н. Оценка допустимого отбора речных вод пойменными рыбхозами Белорусского Полесья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 76–99. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99, EDN: JXWXYZ

Assessment of permissible withdrawal of river waters by floodplain fish farms of the Belarusian Polesie

Aleksandr A. Volchek ✉, Denis N. Dashkevich, Mikhail F. Kukharevich, Sergey I. Parfomuk, Svetlana V. Sidak, Nikolay N. Sheshko, Natalia N. Shpendik

✉ volchak@tut.by

Brest State Technical University, Brest, Belarus

ABSTRACT

Relevance. The article presents the results of a comprehensive study of the impact on river runoff of the fish farms located in the river floodplains in the Belarusian Polesie. Calculations

© Волчек А.А., Дашкевич Д.Н., Кухаревич М.Ф., Парфомук С.И., Сидак С.В., Шешко Н.Н., Шпендик Н.Н., 2025

of hydrological parameters for sections above and below the water extraction sites were performed, cross-sections were constructed. Minimum average monthly water discharges of 95% probability and environmental runoff were determined taking into account the intra-annual distribution of runoff of various probabilities. **Methods.** This study used mathematical method, justification method, geo/ecological method, comparative-descriptive method, and hydrological risk analysis. **Results.** Mathematical models for river sections were constructed, which make it possible to determine the runoff rates and water discharges, as well as the volumes of permissible water withdrawal from rivers used for the needs of fish farms while ensuring the condition of maintaining environmental runoff in the rivers, depending on the average water depth in the section. Based on operational hydraulic calculations, estimates of the impact of water withdrawal by the studied fish farms on changes in the hydrological regime of water bodies were obtained.

KEYWORDS: Belarusian Polesie, water content of the year, model, probability, floodplain, profile, cross-section, runoff, water discharge, fish farm, level, environmental runoff.

For citation: Volchek A.A., Dashkevich D.N., Kukharevich M.F., Parfomuk S.I., Sidak S.V., Sheshko N.N., Shpendik N.N. Assessment of permissible withdrawal of river waters by floodplain fish farms of the Belarusian Polesie. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 1. P. 76–99. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99, EDN: JXWXYZ

ВВЕДЕНИЕ

Белорусское Полесье традиционно славилось обилием и разнообразием рыбных ресурсов. Однако крупномасштабная мелиорация во второй половине прошлого века и интенсивное использование сельскохозяйственных угодий привели к снижению естественных рыбных ресурсов. Для компенсации этой убыли на реках Белорусского Полесья были созданы пойменные рыбхозы. Деятельность рыбхозов внесла изменения в естественный водный режим, что требует объективной оценки их воздействия на гидрологический режим рек. Это позволит повысить эффективность управления водными ресурсами с учетом обеспечения экологического функционирования водных объектов [1, 2].

По поручению Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь летом 2021 г. учеными Брестского государственного технического университета выполнено комплексное исследование рек, в поймах которых расположены следующие рыбхозы: р. Бобрик (рыбхоз «Полесье»), р. Вислица («Полесье»), р. Лань («Локтыши»), р. Морочь («Красная Слобода»), р. Пина («Полесье»), р. Птичь («Тремля»), р. Случь («Белое»), р. Смердь («Лахва»), р. Тремля «Тремля»), р. Филипповка («Полесье»), р. Ясельда («Селец»).

В ходе комплексной оценки воздействия расположенных в бассейнах рек Белорусского Полесья рыбхозов планировалось решить следующие задачи:

– выполнить анализ имеющейся гидрологической информации для установления репрезентативного периода расчета гидрологических характеристик;

– провести рекогносцировку исследуемых рек, заложить створы выше и ниже участков изъятия воды для нужд рыбхозов, построить поперечные профили, рассчитать гидрологические характеристики;

– выполнить гидрологические расчеты по определению минимальных среднемесячных расходов воды 95 % вероятности превышения и экологического стока с учетом внутригодового распределения стока различной обеспеченности;

– разработать математические модели для участков рек, расположенных ниже и выше рыбхозов в виде специальных графиков, позволяющих, в зависимости от средней глубины воды в створе, определить скорости течения и расходы воды;

– выполнить оперативные гидравлические расчеты с целью оценки воздействия изъятия воды исследуемыми рыбхозами на изменение гидрологического режима водных объектов;

– разработать математические модели для определения глубин, скоростей течения и расходов воды в исследуемых створах ниже рыбхозов, соответствующих экологическому стоку, которые позволят решать прямую и обратную задачи движения водных масс в открытых руслах;

– определить объемы допустимого изъятия воды из рек, используемых для нужд рыбхозов, с учетом потерь на испарение и фильтрацию из водохранилищ и прудов, при обеспечении условия сохранения в реках экологического стока, что позволит определить наиболее эффективный режим наполнения рыбоводческих прудов.

При изъятии воды из реки необходимо обеспечить экологический сток – то количество воды, которое должно оставаться в водотоке для обеспечения условий существования гидробионтов и качества воды. В этом случае сохраняются экосистемы пойм, а река остается элементом ландшафта. Таким образом, экологический сток обеспечивает количественное и качественное состояние водного объекта в самый маловодный период [2, 3].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных взяты материалы наблюдений Департамента гидрометеорологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по гидрологическим постам за период инструментальных наблюдений как на исследуемых реках, так и на реках-аналогах, опубликованные в государственных кадастрах, а также результаты исследований, представленные в работах [3–7]. Кроме того, учтены результаты собственных изысканий на участках рек в летний период 2021 г.

Для определения расчетных гидрологических характеристик годового стока воды и его внутригодового распределения рек Ясельда, Случь, Птичь, Лань и Бобрик применены методы расчетов при наличии данных гидрологических наблюдений – непосредственно по этим данным с учетом требований, изложенных в[1] [8]. Пропущенные данные в рядах наблюдений по рекам Морочь, Пина и Тремля за период 1954–2018 гг. восстановлены с привлечением данных наблюдений рек-аналогов.

При определении гидрологических характеристик рек Смердь, Филипповка, Вислица использованы региональные методы расчета гидрологических характеристик[1] [8]. Данные р. Смердь восстановлены по реке-аналогу Цна, р. Филипповка – по реке-аналогу Ясельда, р. Вислица – по р. Случь.

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

Методика определения экологического стока рек

Изъятие воды из реки ведет к общему уменьшению речного стока, но при этом должен оставаться объем, который обеспечивал хотя бы минимальные условия сохранения водных экосистем. В общем случае экологический (минимально допустимый) сток должен учитывать следующие факторы [9–11]:

– объем, необходимый для нормального развития гидробионтов. В этом случае требуется сохранять скорости течения воды в диапазоне 0,25–0,6 м/с (0,25 м/с – нижний предел скоростного режима, при котором начинается бурное развитие фитопланктона) при глубине потока не менее 0,1–3 м. Важными с точки зрения средообразующих функций являются меженные периоды лета и зимы;

– выполнение рекой ее природных функций. Речная сеть транспортирует вещества и энергию, перераспределяя их во времени и в пространстве;

– внутригодовую изменчивость стока. Наличие изменчивости стока реки в течение года поддерживает естественную цикличность в развитии различных биологических видов;

– изменчивость стока по годам. Как и внутригодовая изменчивость, колебания объемов стока по годам позволяют обогащать пойменную часть водотока питательными веществами. Одновременно затопление уничтожает гидрофобные растения, заселяющие пойму за маловодный период.

В настоящее время разработаны различные способы оценки величины экологического стока, которые условно объединены в четыре группы [9].

Способ минимальных расходов предполагает, что размер минимального (экологического) стока принимается равным минимальному среднемесячному стоку 95 % обеспеченности [12]. Кроме того, объем экологического стока принимается в зависимости от вариации годового стока реки [13]. При значительной изменчивости годового стока экологический сток может доходить по абсолютному значению до минимального годового стока. Экологический сток определяется как доля от расчетной величины (табл. 1) [14].

Таблица 1. Критерии определения экологического стока
Table 1. Criteria for determining environmental runoff

Коэффициент вариации	Размер экологического стока	Способ градации	Размер экологического стока
$C_v < 0,25$	минимальный месячный сток	ручьи	3 % от минимального суточного стока
$C_v = 0,25…0,40$	минимальный меженный сток	малые реки	20 % от минимального суточного стока
$C_v > 0,40$	минимальный годовой сток	средние реки	75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности

Примечание: C_v – коэффициент вариации.

В Беларуси размер экологического стока принимается как 75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности. Но данный подход имеет су-

щественные недостатки, а именно: не включает внутригодовую изменчивость стока, не учитывает многолетние циклы водности и минимальную скорость течения воды. Поэтому в настоящем исследовании использован разработанный авторами метод расчета экологического стока, который был детально апробирован на р. Ясельда [14, 15].

Наиболее эффективным способом определения экологического стока с учетом внутригодового распределения является способ повышения обеспеченности. Но применение полноценного метода переноса обеспеченностей (оценки параметров функции распределения) по двум точкам приводит к значительным расхождениям в результатах, на которые влияет также структура временного ряда. Поэтому предложено использовать три точки для оценки параметров функции распределения. Возможны два близких варианта выбора перехода обеспеченностей:

$$\begin{aligned} &25\% \Rightarrow 5\%,\ 50\% \Rightarrow 25\%,\ 99\% \Rightarrow 95\%; \\ &25\% \Rightarrow 5\%,\ 75\% \Rightarrow 50\%,\ 99\% \Rightarrow 95\%. \end{aligned} \qquad (1)$$

Первый вариант ближе к методу перехода, предложенному в [16], только с добавлением одной точки 25% ⇒ 5%. Второй вариант составлен в большей степени интуитивно, но при этом базируется на подходах, описанных выше. Перенос обеспеченностей позволяет получить функцию плотности распределения случайной величины экологического стока. Это дает возможность, в зависимости от сути инженерной задачи, получить экологической сток заданной обеспеченности. После чего можно рассчитать внутригодовую структуру экологического стока, учитывающую важные с биологической точки зрения периоды водности реки. Перенос обеспеченностей применим не только к функции распределения Крицкого – Менкеля, его применение возможно без ограничений и для других законов распределения.

Методика проведения полевых изысканий по определению основных характеристик реки в расчетных створах. Участок реки и места для оборудования постовых устройств определялись выше точки изъятия воды и ниже точки ее сброса рыбхозами, методика измерений осуществлялась согласно рекомендациям[2] [17].

Алгоритм математической модели уровней и расходов

Для определения средней глубины потока и его средней скорости для расходов воды различной обеспеченности в каждом створе необходимо решение двух задач:

– обустройство временного (для разовых наблюдений) водомерного поста и измерение основных характеристик потока;

– определение водности года исследуемого водотока на текущий момент времени.

По результатам стандартных гидрометрических работ определялись отметки характерных точек русла, на основе которых строился поперечный про-

[2] СО 1070:2018 Гидрометрия. Гидравлический метод расчета расхода воды (ISO 1070:2018 Hydrometry – Slope-area method).

филь русла и вычислялись площади поперечного сечения, смоченный периметр и гидравлический радиус для различной глубины наполнения.

Для вычисления площади многоугольника используются формулы следующего вида:

$$\omega = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(x_i(y_{i+1} - y_{i-1})), \quad (2)$$

$$\chi = \sum_{i=1}^{n-1}\sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}, \quad (3)$$

где x_i и y_i – координаты i-той точки рассматриваемого многоугольника, м;

n – количество точек многоугольника.

Таким образом, задавая приращение глубины Δh, строится зависимость площади поперечного сечения ω и средней глубины $h_{ср}$. Приращение глубины принимается в зависимости от выраженности рельефа дна водотока, но рекомендуется принимать количество итераций τ>, тогда $\Delta h = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{\tau}$. Аналогично определяется зависимость смоченного периметра χ и гидравлического радиуса R. Схема численной обработки данных промерных работ приведена на рис. 1.

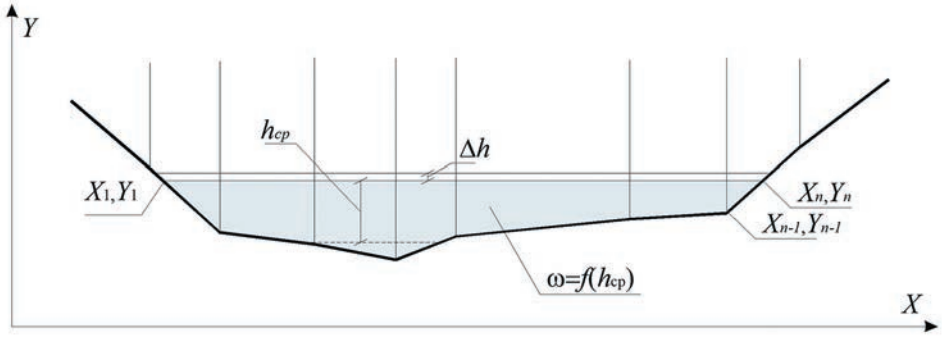


Рис. 1. Схема численной обработки данных промерных работ.
Fig. 1. Scheme of numerical processing of survey data.

С использованием полученных массивов $[\omega, h_{ср}]$ и $[R, h_{ср}]$ выполняется оценка параметров регрессионной модели вида [18]:

$$z = \alpha \cdot h_{ср}^2 + \beta \cdot h_{ср} + \phi, \quad (4)$$

где z – прогнозируемый геометрический параметр русла;

α, β, ϕ– константы регрессионной модели.

С помощью определения зависимости площади живого сечения от средней глубины в форме функции вида (4) можно найти численное решение уравнения Шези по средней глубине потока:

$$Q_{P\%} = \omega_{P\%} C_{P\%} \sqrt{R_{P\%} i}, \quad (5)$$

где $C_{P\%}$ – коэффициент Шези, м^{0,5}/с;

$i = i_0$ – гидравлический уклон, при равномерном установившемся движении можно принять как средний уклон дна водотока (первое допущение).

Выполнив некоторые преобразования, получим из уравнения (5) систему уравнений:

$$\begin{cases} Q_{P\%} = \omega_{P\%} C_{P\%} \sqrt{R_{P\%} i} \\ \omega_{P\%} = \alpha_{\omega} \cdot h^2_{\text{ср}P\%} + \beta_{\omega} \cdot h^2_{\text{ср}P\%} + \phi_{\omega} \\ R_{P\%} = \alpha_{R} \cdot h^2_{\text{ср}P\%} + \beta_{R} \cdot h^2_{\text{ср}P\%} + \phi_{R} \\ C_{P\%} = \dfrac{R_{P\%}^{2,5\sqrt{n}-0,13-0,75\sqrt{R_{P\%}}(\sqrt{n}-0,1)}}{n}. \end{cases} \quad (6)$$

Так как в уравнении (6) количество неизвестных больше, чем количество уравнений, то предполагаем (второе допущение), что измеренные значения гидравлических характеристик стока $Q_{\text{изм}}$, $R_{\text{изм}}$, $\omega_{\text{изм}}$,$C_{\text{изм}}$, i и искомая средняя глубина воды заданной обеспеченности относятся к одному гидрологическому сезону. Исходя из этого шероховатость русла водотока определяется по формуле Н.Н. Павловского:

$$C_{\text{изм}} = \frac{R_{\text{изм}}^{2,5\sqrt{n}-0,13-0,75\sqrt{R_{\text{изм}}}(\sqrt{n}-0,1)}}{n}, \quad (7)$$

где $C_{\text{изм}} = \dfrac{Q_{\text{изм}}}{\omega_{\text{изм}}\sqrt{R_{\text{изм}} i}}$ – коэффициент Шези, определяемый на основе измеренных значений расхода и параметров поперечного сечения русла водотока, м^{0,5}/с.

Формула Н.Н. Павловского принята как наиболее устойчивая в условиях малых значений гидравлического радиуса. Необходимо также отметить, что при численном решении уравнения (5) следует учитывать границы применимости регрессионных уравнений, т. е. решение данного уравнения должно находиться в пределах $0 < h_{\text{ср}P\%} < h_{\text{ср}\,max}$, т. к. экстраполяция данных зависимостей может привести к ошибочным результатам.

На следующем этапе камеральной обработки выявляем водность гидрологического года для исследуемой реки. Для определения водности текущего года подбираем реку-аналог, имеющую длинный ряд наблюдений за гидрологическим режимом. Как показал предварительный анализ, водность года с высокой достоверностью аппроксимации (корреляция > 0,75) определяют месяцы, предшествующие расчетному. При определении параметров функции распределения (трехпараметрического гамма-распределения) применяется метод наибольшего правдоподобия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ гидрологических характеристик для р. Бобрик проведен на расчетном участке ниже водохранилища Погост, р. Вислица – на участке рыбхоза «Полесье», р. Лань – рыбхоза «Локтыши», р. Морочь – рыбхоза «Красная Слобода», р. Пина – возле н. п. Дубое, р. Птичь – на участке рыбхоза «Тремля», р. Случь – рыбхоза «Белое», р. Смердь – рыбхоза «Лахва», р. Тремля – рыбхоза «Тремля», р. Филипповка – на участке впадения в р. Пина, р. Ясельда – рыбхоза «Селец».

По исследуемым рекам установлены годовые расходы воды различной обеспеченности и их внутригодовое распределение. Внутригодовое значение

стока определено в зависимости от наличия данных наблюдений. При их наличии – методом компоновки сезонов, а при отсутствии – по рекам-аналогам или типовым схемам. Данные о среднегодовых расходах воды исследуемых рек и их внутригодовое распределение приведены в табл. 2.

Таблица 2. Внутригодовое распределение стока рек в средний по водности год, м^3/с
Table 2. Intra-annual distribution of river runoff in an average water year, m^3/s

Река	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Бобрик	3,22	3,13	6,40	12,5	6,31	3,73	2,58	1,97	2,12	2,46	3,33	3,77	4,29
Вислица	0,93	1,12	4,41	7,15	1,85	0,99	0,67	0,50	0,74	1,11	1,94	1,42	1,90
Лань	3,31	3,36	4,96	5,65	3,07	2,10	1,86	1,99	2,71	2,93	2,83	2,80	3,11
Морочь	3,36	4,70	17,2	22,7	4,75	3,07	2,59	2,53	2,68	3,33	5,10	4,81	6,42
Пина	21,9	26,6	34,6	37,0	22,5	15,1	13,3	10,7	9,77	11,1	15,4	18,7	19,6
Птичь	43,8	42,9	69,4	113	65,0	38,4	30,7	26,5	28,2	34,1	41,0	44,0	48,1
Случь	16,8	16,6	31,8	56,1	23,1	12,5	9,9	8,9	10,7	13,5	15,8	16,2	19,1
Смердь	1,72	3,36	4,47	7,41	5,64	2,49	1,16	0,70	0,75	1,05	1,72	1,24	2,64
Тремля	1,68	1,57	2,74	3,17	1,77	1,39	1,37	1,23	1,34	1,38	1,64	1,70	1,75
Филипповка	0,26	0,31	1,23	2,00	0,52	0,28	0,19	0,14	0,207	0,31	0,54	0,39	0,53
Ясельда	4,45	4,36	6,83	9,64	4,74	3,10	2,86	3,27	4,40	4,48	4,40	4,62	4,75

Анализ внутригодового распределения стока рек Ясельда и Лань по месяцам показал, что на весенний период приходится 37 % и 36 % от годового стока соответственно, зимний сток составляет 24 %, 25 % от годового стока, на летне-осенний сезон приходится 39 %, 38 %. Для рек Смердь, Морочь и Случь распределение следующее: весенний период составляет 55 %, 58 %, 48 % от годового стока соответственно, зимний сток – 20 %, 18 %, 22 %, на летне-осенний сезон приходится 25 %, 25 %, 30 % от годового стока. Анализ внутригодового распределения стока также показал, что на р. Тремля на весенний период приходится 37 %, зимний сток составляет 23 %, на летне-осенний сезон приходится 40 % от годового стока. На реках Бобрик, Пина, Филипповка, Вислица, Птичь основной сток проходит в весенний период (49 %, 40 %, 59 %, 59 %, 43 % от годового стока соответственно), зимний сток составляет 20 %, 28 %, 15 %, 15 %, 23 %, на летне-осенний сезон приходится 31 %, 32 %, 26 %, 26 %, 34 %.

В связи с тем, что при эксплуатации водохранилищ возникают случаи катастрофического дефицита воды, как это было в сезоне 2012 г. на р. Ясельда при заполнении водой прудов рыбхоза «Селец», допускается, при должном обосновании, величину экологического стока принимать как 75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности. Поэтому в табл. 3 приведены

результаты расчета минимальных среднемесячных расходов воды 95 % вероятности превышения (обеспеченности), полученные, как описано выше.

Таблица 3. Минимальные среднемесячные расходы воды 95 % обеспеченности с учетом внутригодового распределения стока, м³/с
Table 3. Minimum average monthly water discharges of 95% probability taking into account the intra-annual distribution of runoff, m³/s

Река	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Бобрик	1,44	1,05	2,84	8,28	4,53	2,35	1,63	0,965	1,07	0,853	1,31	2,19	2,34
Вислица	0,571	0,860	1,21	1,98	0,710	0,513	0,374	0,258	0,374	0,490	0,629	0,451	0,692
Лань	1,62	2,42	3,73	2,74	1,66	1,50	0,70	1,01	1,30	1,59	1,99	1,30	1,77
Морочь	1,84	1,33	11,2	16,0	3,86	1,89	1,05	1,39	1,17	1,59	2,65	2,90	3,85
Пина	8,75	13,1	12,6	19,4	7,80	7,15	4,78	3,24	3,05	4,66	7,72	5,64	8,04
Птичь	22,6	30,8	46,2	62,0	29,6	23,2	16,5	12,7	16,5	20,0	23,1	19,8	26,6
Смердь	1,01	1,23	2,27	3,19	1,30	0,930	0,610	0,563	0,837	0,853	0,972	0,864	1,20
Случь	7,84	11,8	16,6	27,1	9,73	7,04	5,12	3,53	5,14	6,74	8,60	6,19	9,49
Тремля	1,00	0,745	1,72	2,40	1,10	1,06	0,787	0,617	1,03	0,799	0,710	1,17	1,08
Филипповка	0,301	0,170	0,328	0,702	0,532	0,278	0,193	0,112	0,116	0,154	0,189	0,212	0,271
Ясельда	2,88	2,39	2,37	5,66	3,55	2,11	1,49	1,19	3,28	2,40	1,71	1,89	2,54

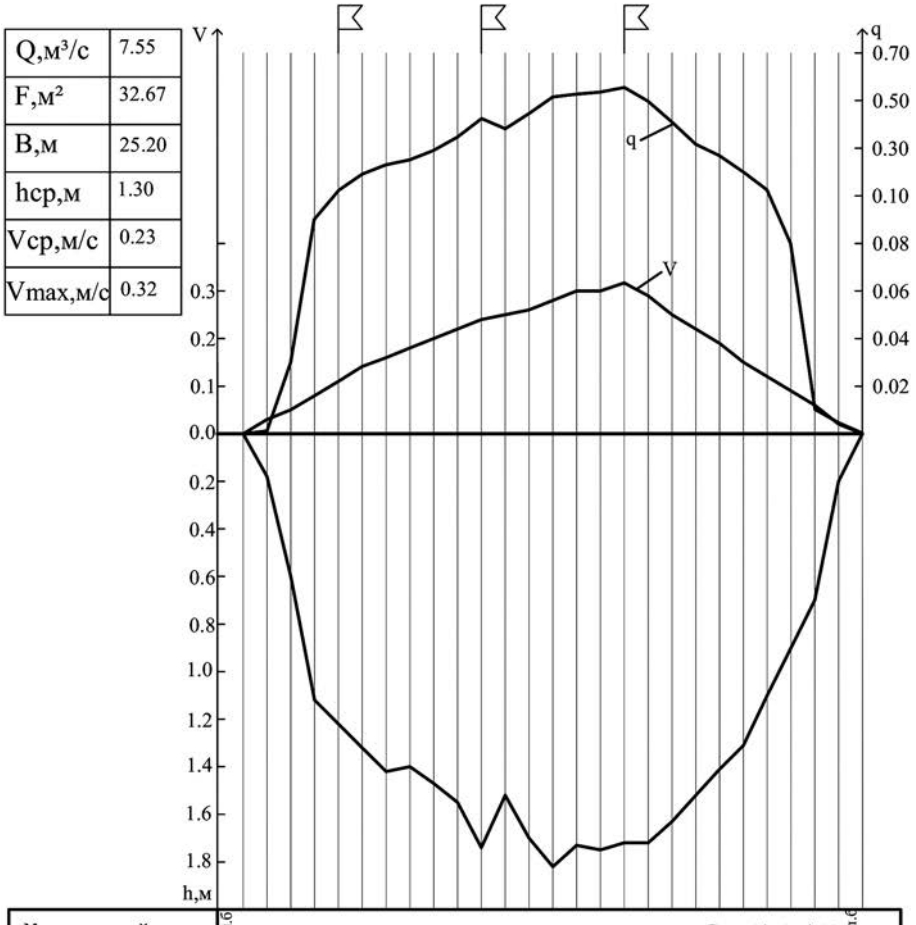
Результаты гидрологических изысканий

В ходе проведенных исследований были созданы гидрометрические посты выше и ниже рыбхозов с устройством временных реперов и определены их координаты. На постах выполнены промерные работы, назначены скоростные вертикали, на которых определены скорости течения воды, измерен уклон дна и водной поверхности. По результатам стандартных гидрометрических работ определены отметки характерных точек русла, на основе которых построены поперечные профили русла верхнего и нижнего створов и установлены морфометрические характеристики.

В качестве примера на рис. 2*а* представлен поперечный профиль р. Случь в верхнем створе, на рис. 2*б* – в нижнем створе. В табл. 4 обобщены основные гидравлические характеристики исследуемых створов.

Средняя величина глубин исследуемых рек соответствует требованиям экологического стока, чего не скажешь о скоростях течения. Дело в том, что большинство рек Белорусского Полесья имеют малые уклоны, это формирует малые скорости их течения. Аналогичные скорости течения наблюдаются на не подверженных антропогенным воздействиям реках в меженный период, поэтому при расчете экологического стока необходимо учитывать этот факт.

а

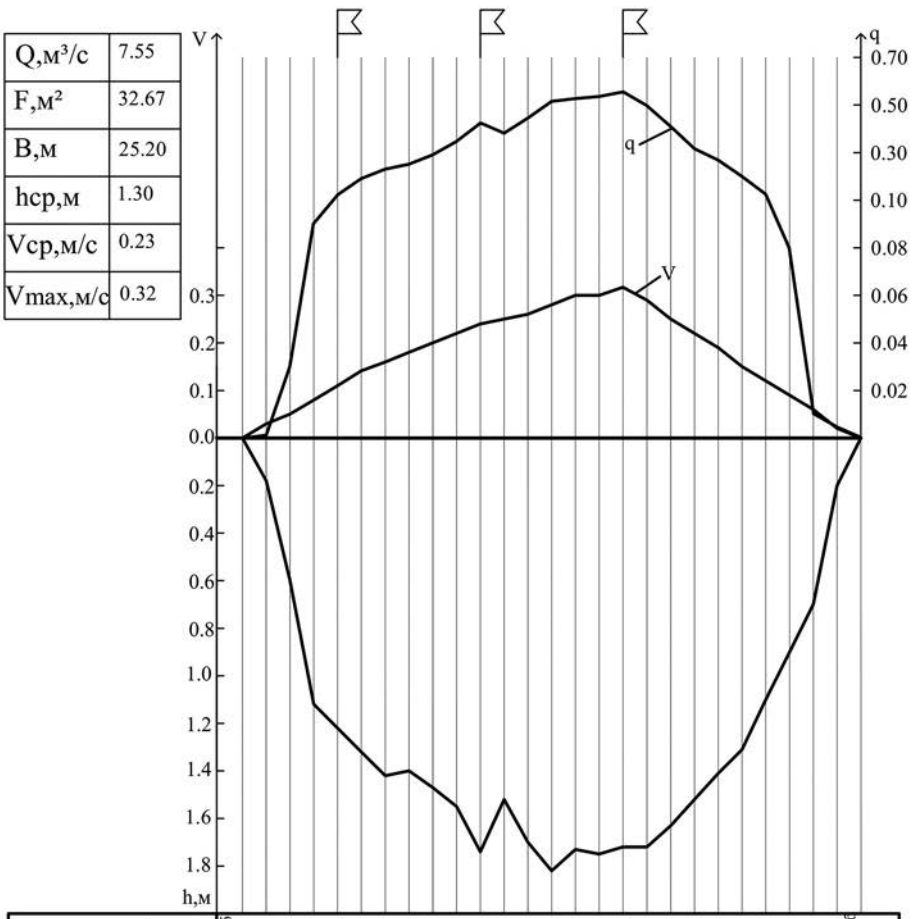


№ вертикалей	Ур.л.б	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Ур.п.б
Расстояние от пост. начала,м	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0.8
Глубина,м	0.00	0.02	0.60	1.12	1.22	1.32	1.42	1.40	1.47	1.55	1.74	1.52	1.70	1.82	1.73	1.75	1.72	1.72	1.63	1.52	1.41	1.31	1.00	0.90	0.70	0.20	0.00
Скорости, м/с	0.00	0.03	0.05	0.08	0.11	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.25	0.26	0.28	0.30	0.30	0.32	0.29	0.25	0.22	0.19	0.15	0.12	0.09	0.06	0.02	0.00
Элементарный расход воды, м²/с	0.00	0.00	0.03	0.09	0.13	0.19	0.23	0.25	0.29	0.34	0.42	0.38	0.44	0.51	0.52	0.53	0.55	0.50	0.41	0.33	0.27	0.20	0.13	0.08	0.04	0.00	0.00

Верхний створ р.Случь

Рис. 2. Поперечный профиль р. Случь в створе: *а* – верхний створ; *б* – нижний створ.
Fig. 2. Cross-section of the Sluch River in the range: *а* is upstream range, *б* is downstream range.

б



№ вертикалей	Ур.л.б	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Ур.п.б
Расстояние от пост. начала,м	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0.8
Глубина,м	0.00	0.02	0.60	1.12	1.22	1.32	1.42	1.40	1.47	1.55	1.74	1.52	1.70	1.82	1.73	1.75	1.72	1.72	1.63	1.52	1.41	1.31	1.00	0.90	0.70	0.20	0.00
Скорости, м/с	0.00	0.03	0.05	0.08	0.11	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.25	0.26	0.28	0.30	0.30	0.32	0.29	0.25	0.22	0.19	0.15	0.12	0.09	0.06	0.02	0.00
Элементарный расход воды, м²/с	0.00	0.00	0.03	0.09	0.13	0.19	0.23	0.25	0.29	0.34	0.42	0.38	0.44	0.51	0.52	0.53	0.55	0.50	0.41	0.33	0.27	0.20	0.13	0.08	0.04	0.00	0.00

Верхний створ р.Случь

Рис. 2. Продолжение. Поперечный профиль р. Случь в створе:
а – верхний створ; *б* – нижний створ.
Fig. 2. Cross-section of the Sluch River in the range: *а* is upstream range, *б* is downstream range.

Таблица 4. Основные гидравлические характеристики исследуемых створов
Table 4. Main hydraulic characteristics of the studied sections

Река	Рыбхоз	Створ	Параметр					
			Q, м³/с	F, м²	B, м	$h_{ср}$, м	$V_{ср}$, м/с	V_{max}, м/с
Бобрик	Полесье	верхний	1,60	3,33	12,1	0,41	0,32	0,38
		нижний	0	30,94	26,0	1,19	0	0
Вислица	Полесье	верхний	0,643	17,53	16,17	1,08	0,04	0,05
		нижний	1,55	34,27	23,80	1,44	0,05	0,09
Лань	Локтыши	верхний	1,19	36,72	28,30	1,30	0,03	0,08
		нижний	0,62	4,73	8,60	0,55	0,13	0,15
Морочь	Красная Слобода	верхний	1,08	13,83	17,40	0,79	0,08	0,14
		нижний	1,42	8,69	16,40	0,53	0,16	0,23
Пина	Полесье	верхний	3,93	175,77	90,30	1,95	0,02	0,05
		нижний	–	–	–	–	–	–
Птичь	Тремля	верхний	11,9	47,46	22,60	2,10	0,25	0,31
		нижний	10,3	43,67	38,10	1,15	0,24	0,28
Случь	Белое	верхний	7,55	32,67	25,20	1,30	0,23	0,32
		нижний	9,55	34,64	26,50	1,31	0,27	0,34
Смердь	Лахва	верхний	2,88	17,78	12,00	1,48	0,16	0,26
		нижний	3,35	14,08	36,00	0,47	0,24	0,33
Тремля	Тремля	верхний	0,229	21,88	17,15	1,26	0,01	0,02
		нижний	0,255	2,21	6,80	0,32	0,12	0,23
Филипповка	Полесье	верхний	0,112	3,33	5,60	0,59	0,03	0,04
		нижний	0,153	3,88	5,70	0,68	0,04	0,05
Ясельда	Селец	верхний	2,43	15,66	16,35	0,96	0,16	0,18
		нижний	2,20	6,38	7,00	0,91	0,35	0,45

Примечание: Q – расход воды в створе, м³/с; F – площадь поперечного сечения створа, м²; B – ширина реки, м; $h_{ср}$. – средняя глубина водного потока, м; $V_{ср}$ – средняя скорость водного потока, м/с; V_{max} – максимальная скорость водного потока в створе, м/с.; отсутствие течения в нижнем створе р. Бобрик вызвано закрытием шлюза в месте впадения ее в р. Припять.

Математические модели уровней и расходов

По результатам обработки данных гидрометрических измерений с применением описанной выше методики получены математические модели (расходы/уровни/скорости) и кривые связи скорости/расхода воды в реках и уровня воды в створе:

$$V = \alpha \cdot h_{ср}^3 + \beta \cdot h_{ср}^2 + \gamma \cdot h_{ср}; \quad (8)$$

$$Q = \delta \cdot h_{ср}^3 + \eta \cdot h_{ср}^2 + \mu \cdot h_{ср}, \quad (9)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \mu$ – эмпирические коэффициенты (табл. 5).

Пример кривой связи расхода воды от средней глубины приведен на рис. 3.

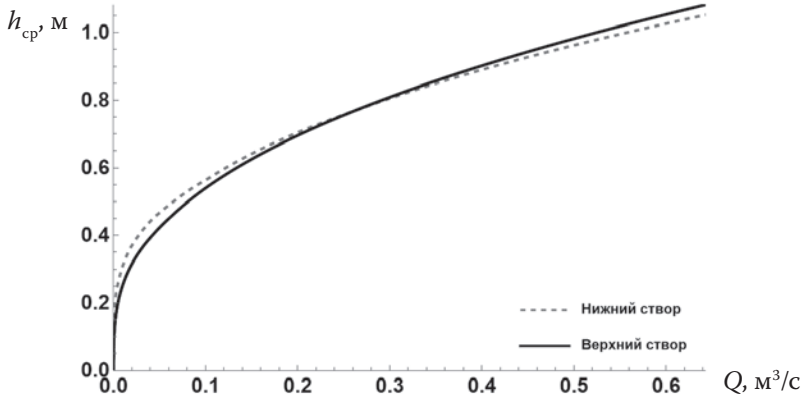


Рис. 3. Кривая связи расхода воды от средней глубины потока р. Вислица.
Fig. 3. The curve of the relationship between the flow rate and the average depth of the flow of the Vislitsa River.

Необходимо отметить, что применение кривых связи допустимо только в пределах установленного диапазона. Применение экстраполяции также допустимо, однако может приводить к значительным отклонениям и погрешностям.

Общий алгоритм использования математических моделей связи средней глубины потока и скорости/расхода воды в русле выглядит следующим образом:

1. При оценке текущего объема стока/скорости в расчетном створе производится измерение средней глубины воды. В качестве точки для измерения средней глубины рекомендуется использовать промерную вертикаль с глубиной на момент проведения изысканий равной или близкой к средней глубине. Данную точку принимают за реперную. После измерения в реперной точке средней глубины (размерность – м) на основе полученных зависимостей определяется расчетная величина расхода/скорости воды в русле (размерность – м^3/с или м/с). После сопоставления расчетной величины расхода с предельными (экологическими) значениями принимается решение об уровне допустимого или недопустимого воздействия на водный режим реки со стороны водопользователей (рыбоводческих прудов).

2. При необходимости оценки средней глубины, соответствующей расчетному расходу, решается обратная задача. По графику, по заданному расчетному расходу графическим методом определяется средняя глубина, ему соответствующая. Средняя глубина сопоставляется с допустимой глубиной, соответствующей экологическому стоку. В случае превышения допустимого воздействия принимается решение о снижении объемов изъятия воды из реки в данный период.

В качестве инженерно-технических решений для повышения эффективности мониторинга за уровнем водопотребления и водопользования предлагается установка измерительного устройства в реперных точках расчетных створов исследуемых рек [19]. Измерительное устройство представляет собой

Таблица 5. Статистические параметры моделей
Table 5. Statistical parameters of the models

Река	Рыбхоз	Створ	Параметр					
			$V_{ср}$, м/с			Q, м³/с		
			α	β	γ	δ	η	μ
Бобрик	Полесье	верхний	2,60	-2,26	1,27	4,62	7,55	-0,07
		нижний	–	–	–	–	–	–
Вислица	Полесье	верхний	-0,02	0,05	0,00	0,29	0,29	-0,05
		нижний	-0,01	0,04	-0,00	0,36	0,29	-0,10
Лань	Локтыши	верхний	-0,01	0,03	0,00	0,49	0,11	-0,04
		нижний	-0,02	-0,02	0,28	2,36	0,97	0,10
Морочь	Красная Слобода	верхний	-0,06	0,11	0,05	2,18	-0,45	0,19
		нижний	0,06	-0,12	0,35	0,63	4,63	-0,05
Пина	Полесье	верхний	0,00	0,01	0,00	0,42	0,36	-0,20
		нижний	–	–	–	–	–	–
Птичь	Тремля	верхний	-0,01	0,04	0,08	1,63	-1,37	0,70
		нижний	-0,05	0,08	0,17	1,64	6,71	-0,69
Случь	Белое	верхний	0,01	-0,04	0,22	0,25	4,31	-0,24
		нижний	0,04	-0,13	0,31	0,51	4,83	-0,14
Смердь	Лахва	верхний	-0,02	0,04	0,08	1,02	-0,41	0,25
		нижний	0,08	-0,17	0,41	0,01	-4,16	0,41
Тремля	Тремля	верхний	0,01	0,00	0,00	0,27	-0,27	0,07
		нижний	–	–	–	–	–	–
Филипповка	Полесье	верхний	-0,06	0,13	0,00	0,56	-0,03	0,01
		нижний	-0,06	0,12	0,00	0,47	0,04	-0,01
Ясельда	Селец	верхний	-0,04	0,05	0,15	1,67	1,04	-0,01
		нижний	0,11	-0,27	0,54	0,21	2,71	-0,24

водомерный пост, включающий одну стационарную сваю. Точка размещения сваи выбирается, исходя из условий эксплуатации реки (судоходство, рыбная ловля, сезонное удаление водорослей и т. д.), а также в зависимости от формы измеренного поперечного сечения в период проведения натурных исследований. Как и в вышеописанном алгоритме, наиболее оптимальной в данном случае будет промерная вертикаль с действительной глубиной, близкой к средней глубине потока для данного сечения.

Свая представляет собой металлическую трубу диаметром от 30 до 80 мм, в боковой стенке которой устроен монтажный паз с механизмом фиксации измерительной штанги. Измерительная штанга выполнена в виде металлической трубы, в нижней части которой размещен обратный механизм фиксации в виде небольшого выступа. Измерительная штанга имеет информационную

раскраску: зеленый цвет соответствует средней глубине с расходом выше экологического для данного створа; желтый – глубине при диапазоне от экологического до критического экологического стока; красный – расход воды в створе меньше критического экологического стока (рис. 4).

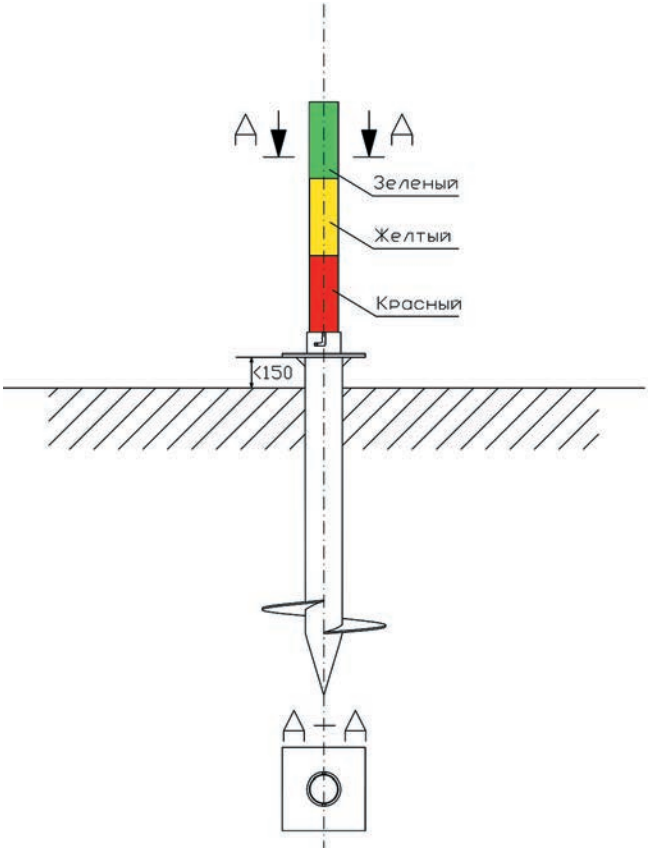


Рис. 4. Измерительное устройство в реперных точках створов.
Fig. 4. Measuring device at reference points.

В критические по водности периоды (в очень маловодные годы обеспеченностью 95 % и больше) измерительная штанга устанавливается в стационарную сваю, в периоды ледостава, ледохода, весеннего половодья временно демонтируется.

Экологический сток рек в различные по водности годы

Определение экологического стока осуществлялось по описанной выше методике. С учетом результатов проведенных натурных исследований и при использовании метода переноса обеспеченностей проведены гидрологические расчеты по определению экологического стока рассматриваемых рек в зависимости от его внутригодового распределения для различных вероятностей превышения (обеспеченностей). В качестве примера в табл. 6 и табл. 7 представлены результаты этих расчетов.

Таблица 6. Экологический сток 95 % вероятности превышения (обеспеченности) с учетом внутригодового распределения, м³/с
Table 6. Environmental runoff of 95 % probability (reliability) taking into account intra-annual distribution, m³/s

Река	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Бобрик	1,08	0,78	2,12	6,19	3,38	1,75	1,22	0,72	0,80	0,64	0,98	1,63	1,77
Вислица	0,44	0,66	0,94	1,53	0,55	0,40	0,29	0,20	0,29	0,38	0,49	0,35	0,54
Лань	1,30	1,94	3,00	2,20	1,33	1,21	0,56	0,81	1,05	1,28	1,60	1,05	1,44
Морочь	1,47	1,06	8,87	12,8	3,07	1,50	0,84	1,10	0,93	1,26	2,11	2,31	3,11
Пина	5,92	8,88	8,55	13,1	5,28	4,84	3,24	2,19	2,07	3,16	5,23	3,82	5,53
Птичь	17,6	23,9	35,9	48,2	23,0	18,1	12,8	9,87	12,8	15,5	17,9	15,4	20,9
Смердь	0,73	0,88	1,62	2,28	0,93	0,66	0,44	0,40	0,60	0,61	0,70	0,62	0,87
Случь	5,99	8,99	12,7	20,7	7,43	5,38	3,91	2,70	3,92	5,15	6,57	4,73	7,35
Тремля	0,83	0,61	1,42	1,98	0,91	0,88	0,65	0,51	0,85	0,66	0,58	0,96	0,90
Филипповка	0,23	0,13	0,25	0,54	0,41	0,21	0,15	0,09	0,09	0,12	0,15	0,16	0,21
Ясельда	2,21	1,83	1,82	4,33	2,72	1,62	1,14	0,91	2,51	1,84	1,31	1,44	1,97

Таблица 7. Экологический сток 5 % вероятности превышения (обеспеченности) с учетом внутригодового распределения, м³/с
Table 7. Environmental runoff of 5 % probability (reliability) taking into account intra-annual distribution, m³/s

Река	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Бобрик	3,22	2,33	6,32	18,5	10,1	5,23	3,63	2,15	2,38	1,90	2,92	4,87	5,29
Вислица	1,93	2,90	4,10	6,69	2,40	1,74	1,26	0,871	1,27	1,66	2,12	1,53	2,371
Лань	3,21	4,79	7,40	5,43	3,29	2,98	1,39	2,00	2,59	3,15	3,95	2,58	3,56
Морочь	4,30	2,56	23,5	25,7	5,71	4,91	2,82	2,02	2,48	4,07	6,23	8,24	7,71
Пина	26,9	40,4	38,9	59,6	24,0	22,0	14,7	9,97	9,40	14,4	23,8	17,4	25,1
Птичь	47,6	64,9	97,3	130,0	62,4	48,9	34,6	26,8	34,7	42,1	48,6	41,7	56,7
Случь	18,8	28,2	39,8	65,0	23,3	16,9	12,3	8,46	12,3	16,1	20,6	14,8	23,0
Смердь	2,55	3,08	5,69	8,01	3,27	2,33	1,53	1,42	2,10	2,14	2,44	2,16	3,06
Тремля	1,799	1,335	3,089	4,315	1,976	1,908	1,412	1,108	1,849	1,436	1,271	2,094	2,00
Филипповка	0,682	0,379	0,743	1,58	1,20	0,630	0,431	0,253	0,262	0,350	0,430	0,480	0,619
Ясельда	6,32	5,24	5,20	12,4	7,80	4,64	3,26	2,61	7,19	5,28	3,75	4,14	5,65

Оценка возможного изъятия речного стока

Величины возможного изъятия воды из реки вычислялись как разность между естественным (стоком расчетной обеспеченности) и экологическим стоком соответствующей обеспеченности расчетного месяца за вычетом потерь на дополнительное испарение с водного зеркала [20] и фильтрацию из

водохранилища. Результаты расчетов при условии обеспечения сохранения в рассматриваемых реках экологического стока с учетом внутригодового распределения для вероятностей превышения (обеспеченностей) 95 % и 5 % приведены в табл. 8 и табл. 9.

Таблица 8. Величины допустимого изъятия поверхностных вод из рек с учетом сохранения экологического стока 95 % вероятности превышения (обеспеченности), млн м^3

Table 8. The values of permissible withdrawal of surface water from rivers taking into account the preservation of environmental runoff of 95 % probability (reliability), million m^3

Река	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Бобрик	0,90	0,65	1,77	5,11	2,61	1,16	0,70	0,31	0,48	0,44	0,78	1,36	16,27
Вислица	0,31	0,47	0,67	1,02	0,16	0,00	0,00	0,00	0,02	0,18	0,31	0,24	3,39
Лань	0,75	1,13	1,76	1,09	0,20	0,00	0,00	0,00	0,14	0,51	0,85	0,60	7,04
Морочь	0,91	0,65	5,56	7,85	1,45	0,30	0,00	0,08	0,19	0,59	1,25	1,43	20,26
Случь	4,57	6,88	9,72	15,74	5,28	3,58	2,42	1,55	2,67	3,77	4,97	3,61	64,76
Смердь	0,72	0,87	1,62	2,26	0,89	0,61	0,38	0,35	0,56	0,59	0,69	0,61	10,15
Пина	7,10	10,64	10,25	15,73	6,33	5,81	3,88	2,63	2,48	3,79	6,27	4,58	79,49
Птичь	12,43	16,92	25,40	34,00	15,95	12,31	8,56	6,54	8,78	10,84	12,63	10,88	175,2
Тремля	0,41	0,30	0,72	0,90	0,12	0,00	0,00	0,00	0,15	0,19	0,24	0,48	3,52
Филипповка	0,18	0,10	0,19	0,41	0,30	0,15	0,09	0,05	0,06	0,09	0,11	0,12	1,84
Ясельда	1,65	1,36	1,35	3,08	1,52	0,51	0,12	0,01	1,46	1,16	0,90	1,07	14,20

Таблица 9. Величины допустимого изъятия поверхностных вод из рек с учетом сохранения экологического стока 5 % вероятности превышения (обеспеченности), млн м^3

Table 9. The values of permissible withdrawal of surface water from rivers taking into account the preservation of environmental runoff of 5 % probability (reliability), million m^3

Река	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Бобрик	2,51	1,81	4,93	14,34	7,65	3,77	2,51	1,39	1,67	1,38	2,25	3,80	48,00
Вислица	1,80	2,71	3,83	6,18	2,01	1,31	0,85	0,52	1,00	1,46	1,95	1,42	25,04
Лань	2,03	3,03	4,70	3,25	1,50	1,11	0,06	0,53	1,17	1,76	2,43	1,63	23,19
Морочь	4,00	2,38	21,94	23,85	4,85	3,94	1,96	1,27	1,92	3,60	5,74	7,68	83,12
Случь	18,48	27,77	39,20	63,85	22,55	16,07	11,49	7,81	11,79	15,73	20,22	14,58	269,5
Смердь	2,38	2,88	5,33	7,49	3,01	2,13	1,37	1,27	1,93	1,98	2,28	2,03	34,09
Пина	40,60	60,85	58,58	89,92	36,19	33,20	22,21	15,03	14,17	21,66	35,83	26,20	454,4
Птичь	43,11	58,70	88,08	118,2	56,14	43,83	30,87	23,77	31,13	37,92	43,93	37,75	613,4
Тремля	1,15	0,85	1,99	2,67	0,93	0,77	0,43	0,28	0,92	0,78	0,77	1,35	12,90
Филипповка	0,62	0,35	0,68	1,45	1,09	0,56	0,38	0,22	0,23	0,32	0,39	0,44	6,72
Ясельда	5,29	4,38	4,35	10,23	6,02	3,19	2,00	1,52	5,61	4,21	3,06	3,46	53,30

Расчет величин допустимого изъятия поверхностных вод, представленный в таблицах 8 и 9, основан на определении рекомендуемого экологического стока способом повышения обеспеченности и представляет собой величины для различных вероятностей превышения (обеспеченностей). При этом, т. к. в Беларуси наименьшее критическое значение экологического стока принимается как 75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности, были рассчитаны величины максимального допустимого изъятия поверхностных вод из исследуемых рек с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ. Эти расчеты представлены в табл. 10, их результаты содержат данные о максимально возможном изъятии воды из рек, когда оставшийся объем составит наименьшее критическое значение экологического стока, равное 75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности. Такая ситуация может случиться с достаточно низкой вероятностью в очень маловодные годы, поэтому следует предусмотреть дополнительные меры по минимизации последствий критически низкого уровня воды в реках.

Таблица 10. Величины максимального допустимого изъятия поверхностных вод из рек с учетом сохранения экологического стока 95 % вероятности превышения (обеспеченности), млн м^3

Table 10. The values of maximum permissible withdrawal of surface water from rivers taking into account the preservation of environmental runoff of 95 % probability (reliability), million m^3

Река	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Бобрик	2,08	1,04	5,68	19,73	9,84	4,11	2,24	0,55	0,92	0,45	1,71	4,00	52,37
Вислица	0,97	1,72	2,63	4,54	1,10	0,52	0,14	0,00	0,28	0,67	1,09	0,66	14,33
Лань	2,82	4,88	8,28	5,52	2,35	1,75	0,00	0,51	1,54	2,50	3,71	1,99	35,85
Морочь	2,73	1,40	26,84	39,31	7,48	2,21	0,00	0,94	0,59	1,87	4,76	5,46	93,60
Случь	13,44	23,65	36,22	63,32	17,95	10,84	5,82	1,77	6,12	10,44	15,36	9,16	214,1
Смердь	1,53	2,08	4,78	7,16	2,23	1,25	0,42	0,31	1,04	1,09	1,42	1,14	24,45
Пина	16,73	28,04	26,77	44,27	14,27	12,60	6,47	2,46	1,98	6,16	14,07	8,70	182,5
Птичь	33,94	55,14	95,10	136,1	51,78	35,08	17,46	7,79	17,75	26,94	35,07	26,65	538,7
Тремля	1,39	0,71	3,25	4,91	1,30	1,09	0,35	0,00	1,19	0,73	0,58	1,81	17,30
Филипповка	0,56	0,22	0,64	1,60	1,15	0,49	0,26	0,06	0,07	0,18	0,27	0,33	5,83
Ясельда	5,13	3,86	3,81	12,15	6,36	2,46	0,80	0,10	5,75	3,69	2,02	2,55	48,69

Полученные результаты проанализируем на примере р. Ясельда для рыбхоза «Селец», как одного из самых крупных рыбхозов Беларуси. Так, величины допустимого изъятия поверхностных вод с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилища в очень маловодный год составляют от 14,20 млн м^3 при экологическом стоке 95 % вероятности превышения (обеспеченности) до 53,30 млн м^3 в очень многоводный год при экологическом стоке 5 % вероятности превышения. Необходимый объем по правилам эксплуатации – 35,81 млн м^3. Величина максимально допустимого

изъятия поверхностных вод из реки с учетом сохранения наименьшего критического значения экологического стока не может превышать 48,69 млн м^3. При этом наибольшее изъятие допустимо в весенние месяцы (март – май) – от 5,95 млн м^3 (сток 95 % обеспеченности) до 20,60 млн м^3 (сток 5 % обеспеченности), а наименьшее – летом (с июня по август) – от 0,65 до 6,71 млн м^3 соответственно для стока 95 % и 5 % вероятностей превышения. Таким образом, в годы по водности P < 50 % в расчетах водохозяйственных балансов необходимо использовать экологический сток расчетной обеспеченности. В годы по водности P > 50 % в отдельные периоды в нижний бьеф допускается сбрасывать воды меньше, чем рассчитанный экологический сток, но не менее 75 % от месячного расхода воды 95 % обеспеченности.

Для других рыбхозов условие соблюдения расчетного экологического стока соблюдается. Например, необходимый для рыбхоза годовой объем изъятия по р. Пина составляет 31,94 млн м^3, а допустимый объем забора воды при экологическом стоке 95 % обеспеченности – 182,5 млн м^3; р. Лань – 36,00 и 35,85 млн м^3 соответственно; р. Морочь – 49,00 и 93,60 млн м^3; р. Тремля – 16,65 и 17,30 млн м^3; р. Случь – 15,73 и 214,1 млн м^3; р. Смердь – 9,41 и 24,45 млн м^3.

Для анализа и оценки уровня воздействия рыбохозяйственных предприятий на водный режим исследуемых рек введена цветовая индикация. В качестве критерия отнесения к той или иной зоне по уровню воздействия принято соотношение текущего объема изъятия воды рыбохозяйственным предприятием к доступному объему изъятия при различных условиях. Введены три основные зоны (табл. 11).

Таблица 11. Зоны уровня воздействия рыбохозяйственных предприятий на водный режим рек
Table 11. Zones of the level of impact of fisheries enterprises on the water regime of rivers

Зона	Критерий отнесения
Зеленая зона	Объем изъятия воды не превышает доступный при расчетном экологическом стоке 95 % вероятности превышения.
Желтая зона	Объем изъятия воды превышает доступный при расчетном экологическом стоке 95 % вероятности превышения, но меньше критического значения экологического стока, принимаемого как 0,75 от минимального месячного стока 95 % обеспеченности.
Красная зона	Объем изъятия превышает максимально допустимый при расчетном критическом значении экологического стока.

С целью более эффективного управления и анализа деятельности рыбохозяйственных предприятий зеленую зону разделим на две подзоны:

1. Зеленая зона, подзона 1 – объем изъятия воды не превышает доступный при расчетном экологическом стоке 75 % вероятности превышения;

2. Зеленая зона, подзона 2 – объем изъятия воды превышает доступный при расчетном экологическом стоке 75 % вероятности превышения, но меньше в случае экологического стока 95 % вероятности превышения.

Для каждой зоны и подзоны рекомендуются действия с целью обеспечения допустимого уровня воздействия на водные объекты хозяйственной деятельности рыбохозяйственных предприятий (табл. 12).

Таблица 12. Допустимые уровни воздействия хозяйственной деятельности рыбохозяйственных предприятий на водные объекты по зонам
Table 12. Permissible levels of impact of economic activities of fisheries enterprises on water bodies by zones

Зона	Уровень воздействия на водные объекты
Зеленая зона, подзона 1	Уровень воздействия на водные объекты значительно ниже его допустимых значений. Рекомендуется сохранить текущий уровень воздействия без его увеличения.
Зеленая зона, подзона 2	Уровень воздействия на водные объекты значительно ниже допустимого, однако в отдельные маловодные и экстремально маловодные периоды может наблюдаться напряженная экологическая обстановка в акватории. Рекомендуется рыбохозяйственным предприятиям разрабатывать план действий для очень маловодных лет.
Желтая зона	Уровень воздействия на водные объекты превышает допустимый. Предприятиям необходимо пересматривать водохозяйственный баланс и, возможно, технологии выращивания рыбы.
Красная зона	Критический уровень воздействия хозяйственной деятельности на водный объект. Данный уровень незамедлительно должен быть снижен, а также проведен дополнительный анализ деятельности предприятия как в части обоснованности текущего уровня производства, так и возможности вовлечения иных источников водных ресурсов. Красная зона является полностью неприемлемой с точки зрения сохранения водотоков и их экосистем.

Данные по существующим объемам изъятия рыбхозами поверхностных вод из изучаемых рек предоставлены РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов». Сопоставление объемов изъятия и рассчитанных величин допустимого изъятия поверхностных вод из исследуемых рек с учетом сохранения экологического стока с использованием предложенного зонирования уровней воздействия рыбохозяйственных предприятий на водный режим рек позволило разделить реки по зонам в зависимости от степени воздействия на водные объекты (табл. 13).

Таблица 13. Разделение рек по зонам в зависимости от степени воздействия на водные объекты
Table 13. Division of the studied rivers into zones depending on the degree of impact on water bodies

Зона	Река
Зеленая зона, подзона 1	Смердь, Случь, Бобрик, Пина, Филипповка, Вислица, Птичь
Зеленая зона, подзона 2	
Желтая зона	Ясельда, Лань, Морочь, Тремля
Красная зона	

Представленные расчеты и составленные по ним рекомендации основаны на существующих данных по объемам изъятия рыбхозами поверхностных вод из рек. В дальнейшем следует руководствоваться приведенными расчетами (табл. 10–13), и при переходе рек из зеленой зоны в желтую по объемам изъятия поверхностных вод рыбхозами необходимо предпринимать компенсирующие мероприятия по снижению последствий такого перехода, чтобы по возможности находиться в зеленой зоне. Следует также отметить, что красная зона является полностью неприемлемой с точки зрения сохранения водотоков и их экосистем.

ВЫВОДЫ

Таким образом, уровень воздействия рыбохозяйственных предприятий на водный режим всех исследуемых рек соответствует зеленой или желтой зонам согласно приведенной в табл. 12 градации. Ни одна река по уровню воздействия рыбхозов в настоящее время не находится в красной зоне, поэтому на этих водных объектах сохраняется наименьшее критическое значение экологического стока. При этом уровень воздействия рыбохозяйственных предприятий на водный режим большинства изученных рек – Смердь (рыбхоз «Лахва»), Случь («Белое»), Бобрик («Полесье»), Пина («Полесье»), Филипповка («Полесье»), Вислица («Полесье»), Птичь («Тремля») – соответствует зеленой зоне, подзоне 1. Существующие объемы изъятия рыбхозами поверхностных вод из указанных рек ниже допустимых значений, для них рекомендуется сохранить текущий уровень воздействия без его увеличения. Уровень воздействия рыбохозяйственных предприятий на водный режим рек Ясельда («Селец»), Лань («Локтыши»), Морочь («Красная Слобода») и Тремля («Тремля») находится в желтой зоне. Это свидетельствует о том, что объемы изъятия рыбхозами поверхностных вод из этих рек превышают допустимые величины, следует пересматривать водохозяйственный баланс.

Подходы для оценки допустимого отбора речных вод пойменными рыбхозами, предложенные в данной статье, показали свою эффективность и могут быть использованы при решении подобных задач в схожих природно-климатических и гидрологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мониторинг, использование и управление водными ресурсами бассейна р. Припять / под общей ред. М.Ю. Калинина, А.Г. Ободовского. Минск.: Белсэнс, 2003. 269 с.
2. Калинин М.Ю., Станкевич А.П., Волчек А.А., Бамбалов Н.Н., Ободовский А.Г., Васенко А.Г. Проблемы водных ресурсов бассейна р. Припять // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплотехника. 2005. №2 (33). С. 26–29.
3. Логинов В.Ф., Волчек А.А. Водный баланс речных водосборов Беларуси. Минск: Тонпик, 2006. 160 с.
4. Волчек А.А., Грядунова О.И. Минимальный сток рек Беларуси. Брест: БрГУ, 2010. 169 с.
5. Логинов В.Ф., Волчек А.А., Волчек Ан.А. Весенние половодья на реках Беларуси: пространственно-временные колебания и прогноз. Минск: Беларуская навука, 2014. 244 с.
6. Волчек А.А., Шелест Т.А. Паводки на реках Беларуси. Брест: БрГУ, 2016. 199 с.
7. Волчек А.А., Сидак С.В., Парфомук С.И. Многолетняя изменчивость стока рек Беларуси в условиях изменения климата и антропогенных воздействий / Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: сб. трудов IV Межд. науч.-

практ. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та и 50-летию ф-та инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 окт. 2021 г. Брест, 2021. С. 101–113.
8. Волчек А.А. Гидрологические расчеты: уч. пос. М.: КНОРУС, 2021. 418 с.
9. Маркин В.Н. Внутригодовое распределение экологического стока малых рек. URL: http://www.msuee.ru›science/1/tom 1/1_12.doc (дата обращения: 28.04.2013).
10. Маркин В.Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки // Оценка экологически допустимого воздействия на малые реки. URL: http://www. msuee.ru/kmirz/Htmls4/Markin/DopVozd.htm (дата обращения: 04.05.2005).
11. Ткачев Б.П., Буланов В.И. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы. Новосибирск, 2002. 114 с.
12. Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 295 с.
13. Лалыкин Н.В. Определение резервируемого стока малых рек Молдавии // Рациональное использование поверхностных и подземных вод: сб. науч. тр. М.: Гидрометеоиздат, 1986. С. 44–49.
14. Ясельда И.В. Абрамова [и др.]. Реки Полесья / под общ. ред. А.А. Волчека, И.И. Кирвеля, Н.В. Михальчука. Минск: Беларуская навука, 2017. 416 с.
15. Волчек А.А., Парфомук С.И., Шешко Н.Н., Шпендик Н.Н., Дашкевич Д.Н., Сидак С.В., Кухаревич М.Ф. Оценка влияния рыбхоза «Селец» на сток реки Ясельда // Вестник Брестского государственного технического университета. Геоэкология. 2022. № 1 (127). С. 83–85. doi.org/10.36773/1818-1112-2022-127-1-86-96.
16. Arthington A.H., Bunn S.E., Poff N.L. & Naiman R.J. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems // Ecological Applications. 2006. No. 16 (4). P. 1311–1318.
17. Учебная практика по гидрометрии: уч. пособие для студентов высших учебных заведений / А.А. Волчек, М.Ю. Калинин, М.Ф. Мороз, Ю.В. Стефаненко. Минск: Изд. центр БГУ, 2003. 310 с.
18. Статистические методы в природопользовании: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.Е. Валуев, А.А. Волчек, П.С. Пойта, П.В. Шведовский. Брест: Изд-во Брестского политехнического института, 1999. 252 с.
19. Устройство для измерения уровня воды: пат. 13217. Беларусь, МПК U G 01F 23/00 / А.А. Волчек, М.А. Таратенкова, Д.А. Шпока, Е.И. Дмухайло; заявитель Брест. гос. техн. ун-т. № u 20220312; заявл. 30.12.22; опубл. 30.06.23 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2023. № 3. С. 97–98.
20. Волчек А.А., Кирвель П.И., Мельник В.И. Пространственно-временные изменения испарения с поверхности водоемов Беларуси // Природные ресурсы. 2007. № 4. С. 14–23.

REFERENCES

1. Monitoring, use and management of water resources of the Pripyat River basin. Edited by M.Y. Kalinina, A.G. Obodovskogo. Mn.: Belsens, 2003. 269 p. (In Russ.).
2. M.Y. Kalinin, A.P. Stankevich, A.A. Volchek, N.N. Bambalov, A.G. Obodovskij, A.G. Vasenko. Water resources problems of the Pripyat River basin. *BGTU news bulletin.* Water engineering and thermo/engineering. 2005. No. 2 (33). P. 26–29 (In Russ.).
3. Loginov V.F., Volchek A.A. The Belarus river water resources balance. Minsk: Tonpik, 2006. 160 p. (In Russ.).
4. Volchek A.A., Gryadunova O.I. The Belarus rivers' minimal runoff. Brest: BrGU, 2010. 169 p. (In Russ.).
5. Loginov V.F., Volchek A.A., Volchek An.A. Spring floods on the rivers of Belarus: spatial/temporal fluctuations and forecast. Minsk: Belaruskaya navuka, 2014. 244 p. (In Russ.).
6. Volchek A.A., Shelest T.A. High-water periods on the rivers of Belarus. Brest: BrGU, 2016. 199 p. (In Russ.).
7. Volchek A. A., Sidak S.V., Parfomuk S.I. Many-year variability of the Belarus rivers runoff under the climate change conditions and anthropogenic impacts. Relevant scientific/engineering and environmental problems of the environment preservation. Brest. Brest State Polytechnic University. Edited by A. A. Volchek [*et al.*]. Brest, 2021. P. 101–113 (In Russ.).
8. Volchek A.A. Hydro/engineering calculations: a manual. Moscow : KNORUS, 2021. 418 p. (In Russ.).
9. Markin V.N. Within-year distribution of the small rivers' ecological runoff. [Electronic resource]. Access regime: http://www.msuee.ru›science/1/tom 1/1_12.doc. Data: 28.04.2013 (In Russ.).

10. Markin V.N. Determination of ecological permissible impact upon small rivers. [Electronic resource]. Access regime: http://www. msuee.ru/kmirz/Htmls4/Markin/DopVozd.htm. Data: 04.05.2005 (In Russ.).
11. Tkachev B.P., Bulanov V.I. Small rivers: current state and ecological problems. Novosibirsk, 2002. 114 p. (In Russ.).
12. Vladimirov A.M. Rivers' runoff during the low water periods of the year. L.: Gidrometeoizdat, 1976. 295 p. (In Russ.).
13. Lalykin N.V. Determination of the Moldavian rivers' runoff to be reserved. Rational use of surface water and groundwater: collection of scientific articles. M. : Gidrometeoizdat, 1986. P. 44–49 (In Russ.).
14. Yasel'da I.V. Abramova [*et al.*]; Polesye rivers. edited by. A.A. Volchek, I.I. Kirvely, N.V. Mihal'chuk; National Academy of Sciences of Belarus, Polesye Agrarian/ecological Institute. Minsk: Belaruskaya navuka, 2017. 416 p. (In Russ.).
15. Assessment of the "Selets" fishing farm impact on the Yaselda River runoff. A.A. Volchek, S.I. Parfomuk, N.N. Sheshko, N.N. Shpendik, D.N. Dashkevich, S.V. Sidak, M.F. Kuharevich. *Brest State Technological University news bulletin*. 2022. No. 1 (127): Geoekologiya. P. 83–85 (In Russ.). https://doi.org/10.36773/1818-1112-2022-127-1-86-96.
16. Arthington A.H., Bunn S.E., Poff N.L. & Naiman R.J. (2006). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications*. 16 (4). 1311–1318 (In Russ.).
17. Hydro/metrological study practice: a manual for higher school students. A.A. Volchek, M.Y. Kalinin, M.F. Moroz, Y.V. Stefanenko. Minsk: BGU Publishing Center, 2003. 310 p. (In Russ.).
18. Statistical methods in nature use: a manual for higher school students. V.E. Valuev, A.A. Volchek, P.S. Pojta, P.V. Shvedovskij. Brest: Brest State Polytechnic University Publishing House, 1999. 252 p. (In Russ.).
19. A device for the water level changing: pat. 13217 Resp. Belarus', MPK U G 01F 23/00. A.A. Volchek, M.A. Taratenkova, D.A. Shpoka, E.I. Dmuhajlo; the applicant: Brest State Polytechnic University No, u 20220312; aplied. 30.12.22; published. 30.06.23. Official bulletin. National Center for Intellectual property. 2023. No. 3. P. 97–98 (In Russ.).
20. Volchek A.A. Spatial/temporal changes of evaporation from the Belarus water bodies' surface. A.A. Volchek, P.I. Kirvel', V.I. Mel'nik. *Nature resources*. 2007. No. 4. P. 14–23 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Волчек Александр Александрович, д-р геогр. наук, профессор, кафедра природообустройства, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, 224017, Брест, ул. Московская, 257; https://orsid.org/0000-0002-8838-797X; e-mail: volchak@tut.by.

Дашкевич Денис Николаевич, старший преподаватель, кафедра природообустройства, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, 224017, Брест, ул. Московская, 257; e-mail: dionis1303@mail.ru.

Кухаревич Михаил Федорович, аспирант, кафедра природообустройства, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, 224017, Брест, ул. Московская, 257; e-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

Парфомук Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра математики и информатики, факультет электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, 224017, Брест, ул. Московская, 257; https://orsid.org/0000-0002-2134-6241; e-mail: parfom@mail.ru

Сидак Светлана Васильевна, старший преподаватель, кафедра математики и информатики, факультет электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, 224017, Брест, ул. Московская, 257; https://orsid.org/0000-0001-7433-2524; e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Шешко Николай Николаевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра природообустройства, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, 224017, Брест, ул. Московская, 257; https://orsid.org/0000-0001-6373-8166; e-mail: optimum@tut.by

Шпендик Наталья Николаевна, канд. геогр. наук, доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, факультет инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Беларусь, 224017, Брест, ул. Московская, 257; e-mail: shpendik@tut.by

About the authors:

Aleksandr A. Volchek, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Chair of Nature Arrangement, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 257, Brest, 224017, Belarus; https://orsid.org/0000-0002-8838-797X; e-mail: volchak@tut.by

Denis N. Dashkevich, Senior Lecturer, Chair of Nature Arrangement, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 257, Brest, 224017, Belarus; e-mail: dionis1303@mail.ru.

Mikhail F. Kukharevich, Post-graduate Student, Chair of Nature Arrangement, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 257, Brest, 224017, Belarus; e-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

Sergey I. Parfomuk, Ph. D, Associate Professor, Head, Chair of Mathematics and Information Science, Department of Electronic Information Systems, Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 257, Brest, 224017, Belarus; https://orsid.org/0000-0002-2134-6241; e-mail: parfom@mail.ru

Svetlana V. Sidak, Senior Lecturer, Chair of Mathematics and Information Science, Department of Electronic Information Systems, Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 257, Brest, 224017, Belarus; https://orsid.org/0000-0001-7433-2524; e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Nikolay N. Sheshko, Ph. D, Associate Professor, Chair of Nature Arrangement, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 257, Brest, 224017, Belarus; https://orsid.org/0000-0001-6373-8166; e-mail: optimum@tut.by

Natalia N. Shpendik, Ph. D, Associate Professor, Chair of Heat/gas Supply and Ventilation, Department of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 257, Brest, 224017, Belarus; e-mail: shpendik@tut.by

Поступила в редакцию / Received 09.08.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 21.10.2024.
Принята к публикации / Accepted 24.12.2024.

УДК 579.68, 574.51 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-100-117*

Динамика микробных сообществ в условиях активной хозяйственной деятельности в акватории Северного Каспия

Д.Г. Баубекова[1], Е.В. Колмыков[2], Е.М. Мелик-Багдасаров[1]

info@gcipm.ru

[1] *Геоэкологический центр «Изыскания. Проектирование. Мониторинг», Москва, Россия*

[2] *ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», г. Астрахань, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Микробные сообщества относятся к постоянным компонентам водных биоценозов любого водоема. Обладая широким диапазоном адаптационных возможностей, бактериоценозы способны быстро реагировать на смену экологических условий, в полной мере отражая функционирование экосистемы населяемого ими водоема. Оценить состояние гетеротрофного бактериоценоза и качество природных вод можно как по показателям общей численности бактериопланктона, так и по соотношению численности составляющих его бактериальных групп. **Методы.** Использованы стандартные микробиологические методы исследований: учет общей численности бактерий проводился методом эпифлуоресцентной микроскопии, численности эколого-физиологических групп – методом предельных разведений на жидких элективных средах. **Результаты.** Представлены данные по динамике микробных сообществ в условиях активной хозяйственной деятельности в акватории Северного Каспия, в районе месторождения им. В. Филановского, в рамках экологического мониторинга. Анализ временной динамики состояния гетеротрофного бактериопланктона и бактериобентоса выявил изменение рассматриваемых показателей в сезонном аспекте: их увеличение осенью обусловлено в большей степени процессами взмучивания донных отложений, особенностями метаболизма изученных групп гетеротрофов, а также гидрологическими и температурными факторами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологический мониторинг, Каспийское море, водная экосистема, биоресурсы, антропогенное воздействие, бактериопланктон, бактериобентос, сапротрофные бактерии, нефтеокисляющие бактерии, нефтедеструкторы.

Для цитирования: Д.Г. Баубекова, Е.В. Колмыков, Е.М. Мелик-Багдасаров. Динамика микробных сообществ в условиях активной хозяйственной деятельности в акватории Северного Каспия // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 100–117. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-100-117, EDN: NJMDPU

© Баубекова Д.Г., Колмыков Е.В., Мелик-Багдасаров Е.М., 2025

Dynamics of microbial communities under conditions of active economic activity in the water area of the North Caspian

Dinara G. Baubekova[1] ✉, **Evgeniy V. Kolmykov**[2], **Evgeniy M. Melik-Bagdasarov**[1]

✉ info@gcipm.ru

[1]*Center of Geo/ecology "Survey, Designing. Monitoring", Moscow, Russia*
[2]*LUKOIL-Nizhnevolzhskneft, Astrakhan, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Microbial communities are important components of aquatic biocenoses of any reservoir. Possessing a wide range of adaptive capabilities, bacteriocenoses are able to quickly respond to changing environmental conditions, fully reflecting the functioning of the ecosystem of the reservoir under study. The state of a heterotrophic bacteriocenosis and the quality of natural waters can be assessed both by the total number of bacterioplankton and by the ratio of the number of its constituent bacterial groups. **Methods.** Standard microbiological research methods were used: the total number of bacteria was counted by epifluorescence microscopy, the number of ecological and physiological groups was counted by the method of limiting dilutions in liquid elective media. **Results.** The article presents the data on the dynamics of microbial communities under conditions of active economic activity in the waters of the Northern Caspian Sea in the area of the field named after. V. Filanovsky in 2023 are presented as part of environmental monitoring. Analysis of the seasonal dynamics of the state of heterotrophic bacterioplankton and bacteriobenthos revealed a change in the indicators under consideration in a seasonal aspect: their increase is observed in the fall, which is largely due to the processes of resuspension, the metabolic characteristics of the studied groups of heterotrophs, as well as the hydrological and temperature characteristics of the period research. The resulting warming of water masses, as well as the ongoing processes of mineralization of organic substances and the processes of self-purification of the studied reservoir in the autumn period ensured a more active development of bacteriocenosis in the autumn in the studied water area.

KEYWORDS: environmental monitoring, Caspian Sea, aquatic ecosystem, biological resources, anthropogenic impact, bacterioplankton, bacteriobenthos, saprotrophic bacteria, oil-oxidizing bacteria, oil destructors.

For citation: Baubekova D.G., Kolmykov E.V., Melik-Bagdasarov E.M. Dynamics of microbial communities under conditions of active economic activity in the water area of the North Caspian. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 1. P. 100–117. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-100-117, EDN: NJMDPU

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение промышленными и бытовыми стоками, строительство гидротехнических сооружений, последствия морских геологоразведочных работ приводят не только к перестройке биоценозов, но и к снижению их продуктивности и, соответственно, устойчивости [1–3]. Помимо гидрологического и гидрохимического режимов, многофакторное антропогенное воздействие на Каспийское море существенно изменяет его гидробиологический режим. Влияние на среду обитания водных биологических ресурсов влечет за собой

непосредственное воздействие на биоресурсы моря, что может привести к их истощению, а также к смещению естественного равновесия в сторону его нестабильного состояния [4–6].

К одному из важных компонентов водной экосистемы любого водоема относится бактериоценоз, развитие которого определяется комплексом абиотических и биотических факторов. В ряде случаев хозяйственная деятельность приводит к существенному изменению адаптационных механизмов населяющей его микробиоты, сопровождающемуся сменой количественного и качественного состава бактериоценоза [7–9], поэтому проведение микробиологических исследований является важным инструментом экологического мониторинга и оценки состояния водного объекта.

Гетеротрофные бактериоценозы способны быстро реагировать на смену экологических условий благодаря широкому диапазону своих адаптационных возможностей и быстрой реакции на изменения в структуре сообществ путем смены соотношения количества эколого-трофических групп и величин кратковременных колебаний численности [10–12]. Определение численности отдельных трофических групп гетеротрофных бактерий необходимо для более полного анализа всех аспектов функционирования водной экосистемы. Поэтому одним из важнейших показателей качества природных вод считается состояние гетеротрофного бактериоценоза, играющего ключевую роль в круговороте органического вещества в морских экосистемах [13, 14].

Оценить состояние гетеротрофного бактериоценоза и качество природных вод можно как по показателям общей численности бактериопланктона, так и по соотношению численности составляющих его групп, в частности сапротрофов и нефтедеструкторов, т. к. именно они играют решающую роль в минерализации органического вещества и круговороте биогенов.[1,2] Кроме того, сапротрофная группа гетеротрофов развивается в присутствии значительного количества биогенов и органики, в отличие от основной части бактериопланктона, что обеспечивает ее массовое размножение при загрязнении морской акватории и позволяет использовать данную группу микроорганизмов в качестве индикаторной [13, 15].

Согласно литературным данным, исследования микробиоты в северной части Каспийского моря ведутся с 1920-х годов, благодаря чему накоплены разнообразные сведения о роли микроорганизмов в экосистемах Северного Каспия [9, 14–19]. Так, количественные характеристики бактериоценоза Каспийского моря варьируют в очень широких пределах: общая численность бактерий, например, изменяется в диапазоне от сотен тысяч до миллионов клеток в 1 мл воды и от 0,35 до 1,20 млрд клеток в 1 грамме. Это касается и различных эколого-физиологических групп микроорганизмов, численность

[1] ГОСТ 17.1.2.04–77. Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. М.: Издательство стандартов, 1977. 10 с.
[2] ГОСТ 17.1.3.07–82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. М.: Издательство стандартов, 1983. 10 с.

которых может изменяться в зависимости от места и периода отбора проб, от единичных клеток до 10^4 клеток в единице исследуемого объема. При этом пространственное распределение бактериопланктона и бактериобентоса по разным районам акватории также весьма гетерогенно.

Целью исследования, проведенного в 2023 г. в рамках экологического мониторинга акватории Северного Каспия, являлось изучение динамики микробных сообществ в условиях активной хозяйственной деятельности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлась морская вода (16 проб) и донные отложения (16 проб), отобранные в рамках экологического мониторинга в весенний (вторая декада мая) и осенний (первая декада октября) периоды съемок в 2023 г. в акватории Северного Каспия. Пробы отбирали в районе трубопровода месторождения им. В. Филановского в соответствии с нормативной документацией[3,4] с помощью батометра Нискина объемом 10 л из поверхностного водного слоя и дночерпателя с площадью захвата 0,1 м^2 в стерильные полимерные емкости. 16 точек отбора находились на разной глубине: от 0,4 м на западе и до 9,0 м на востоке. Схема точек отбора проб представлена на рис. 1.

Пробы для анализа общей численности и биомассы бактериопланктона фиксировали очищенным 40 %-м формалином до конечной концентрации 2–4 % в пробе. Пробы донных отложений проходили первичную пробоподготовку, после чего для определения воздушно-сухого веса и влажности их взвешивали и высушивали в сушильном шкафу до полного испарения влаги. После этого определялся вес сухого грунта и рассчитывался коэффициент для последующего пересчета микробиологических показателей на воздушно-сухой вес [20].

Учет общей численности бактерий (ОЧБ) проводился стандартным методом эпифлуоресцентной микроскопии в трех повторностях [21–23]. Для этого фиксированный объем аликвоты пробы окрашивали флуоресцентным красителем (акридиновым оранжевым) и фильтровали через мембранные поликарбонатные фильтры с размером пор 0,2 мкм. Окрашенные фильтры просматривали при увеличении ×1000 на люминесцентном микроскопе «Микромед 3 ЛЮМ». Размер клеток бактерий определяли при помощи системы визуализации ToupCam. Объем клеток вычисляли по методу геометрического подобия – по формуле шара для кокков и по формуле цилиндра для вибрионов и палочковидных форм. Общая бактериальная биомасса (ОББ) рассчитывалась в соответствии с объемами бактериальных клеток с последующим пересчетом в весовые единицы измерения – мг веса в углеродных единицах на 1 м^3 [24].

[3] ГОСТ 17.1.5.01–80. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: Изд-во стандартов, 1980. 7 с.
[4] ГОСТ 31942–2012. Вода. Отбор проб для микробиологического анализа. М.: Стандартинформ, 2013. 27 с.

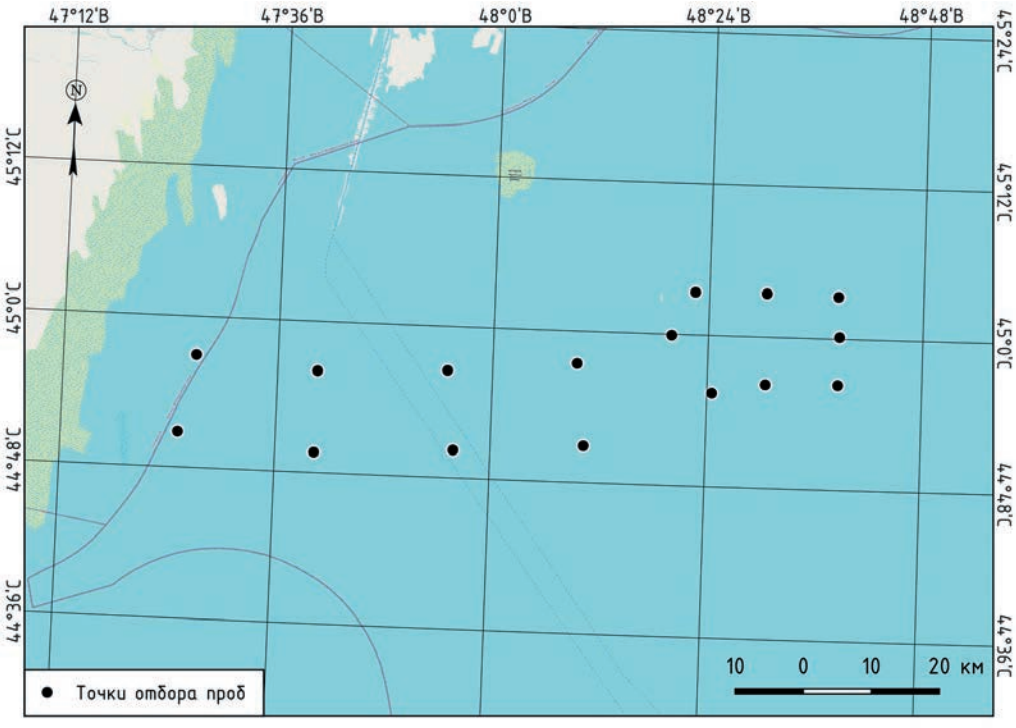


Рис. 1. Схема точек отбора проб в акватории Северного Каспия в районе месторождения им. В. Филановского в 2023 г.
Fig. 1. Scheme of sampling points in the waters of the Northern Caspian Sea in the area of the field named after. V. Filanovsky in 2023.

Учет численности исследуемых эколого-физиологических групп (сапротрофных и нефтеокисляющих) выполнялся методом предельных разведений на жидких элективных средах в трех повторностях [20, 21, 23]. Для определения численности культивируемых бактерий на питательных средах была подготовлена серия последовательных разведений исходной аликвоты пробы с шагом 10. Для сапротрофных бактерий (СБ) использовалась среда Зобелл с высоким содержанием органических веществ; для нефтеокисляющих бактерий (НоБ) – среда Миллса (ММС) с добавлением 0,1 % стерильного дизельного топлива в качестве единственного источника углерода и энергии. Посевы инкубировались в термостате от одной недели для сапротрофов и до месяца для нефтедеструкторов при необходимой для культивации исследуемой группы микроорганизмов температуре. Наиболее вероятная численность (НВЧ) в пробе определялась по статистической таблице Мак-Креди [20, 23]. Оценку разброса данных в экспериментах проводили подсчетом средних величин и среднего квадратичного отклонения для выявления доверительного интервала при 95 % уровне значимости [25, 26]. Результаты экспериментов обрабатывали стандартными методами математической статистики с помощью пакета программ Microsoft Excel, Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состояние микробных сообществ изучаемой акватории Северного Каспия на месторождении им. В. Филановского в 2023 г. определяли путем учета общей численности и биомассы бактерий в морской воде и донных отложениях, численности сапротрофной и нефтеокисляющей групп бактерий, микробиологических показателей основных морфологических групп бактериопланктона и бактериобентоса в весенний и осенний периоды исследований.

Проведенный анализ сезонной динамики общей численности бактериопланктона на исследованной части акватории месторождения им. В. Филановского в Каспийском море в 2023 г. показал увеличение рассматриваемого показателя от весны к осени в 2,5 раза: с 0,70 ± 0,026 до 1,74 ± 0,035 млн кл/мл (рис. 2). В весенний период данный показатель варьировал в диапазоне 0,51–0,89 млн кл/мл, в осенний – 1,50–2,01 млн кл/мл. Сезонные изменения общей численности бактериобентоса на изучаемой акватории отразили повышение изучаемого микробиологического параметра в осенний период исследований в 1,5 раза (от 121,01 ± 5,18 до 200,23 ± 6,28 млн кл/г сухого веса). При этом наблюдали меньшее колебание рассматриваемого показателя весной (84,33–153,81 млн кл/г сухого веса) с более широкой вариацией общей численности осенью (155,67–256,97 млн кл/г сухого веса). В оба периода исследований величины ОЧБ в грунтах были выше значений ОЧБ бактериопланктона, что объясняется большей способностью донных отложений к накоплению органики и микроорганизмов.

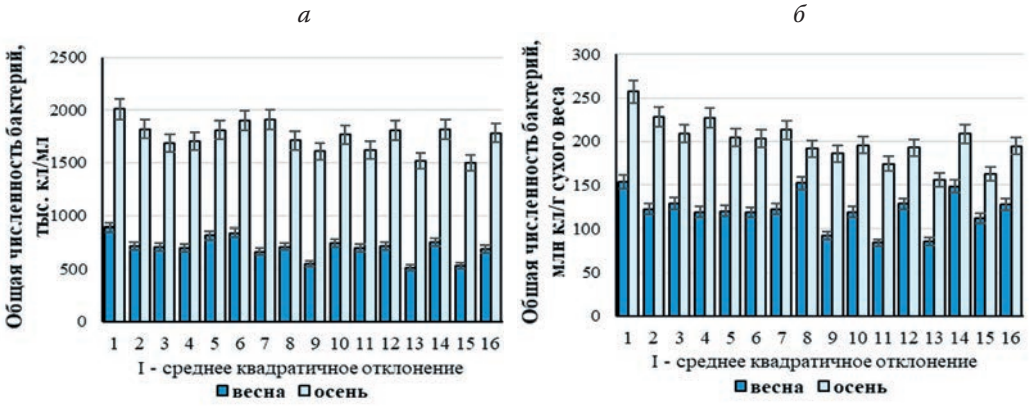


Рис. 2. Значения общей численности бактериопланктона (*а*) и бактериобентоса (*б*) по сезонам в акватории Северного Каспия в районе месторождения им. В. Филановского в 2023 г.

Fig. 2. Values of the total number of bacterioplankton (a) and bacteriobenthos (b) by season in the waters of the Northern Caspian Sea in the area of the field named after. V. Filanovsky in 2023.

Общая биомасса бактерий в акватории месторождения им. В. Филановского также увеличивалась осенью с 34,57 ± 1,59 до 47,25 ± 2,17 мгС/м^3 в морской воде и с 6,05 ± 0,30 до 10,39 ± 0,39 гС/м^3 в грунте (рис. 3). Наряду с этим диапазон количественных изменений общей биомассы бактериопланктона в

весенний период приходился на 24,88–45,66 мгС/м³ и 33,04–61,00 мгС/м³ – в осенний; для бактериобентоса он находился в меньших пределах: 3,91–8,41 гС/м³ и 7,32–13,14 гС/м³ соответственно. Как и в случае с ОЧБ, величины ОББ донных отложений превышали значения ОББ бактериопланктона и в весенний, и в осенний периоды исследований.

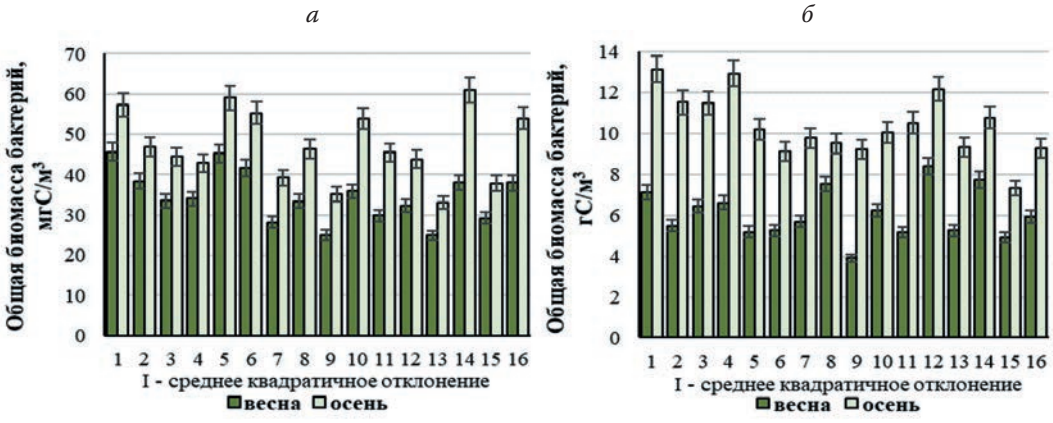


Рис. 3. Значения общей биомассы бактериопланктона (*а*) и бактериобентоса (*б*) (ОББ) по сезонам в акватории Северного Каспия в районе месторождения им. В. Филановского в 2023 г.

Fig. 3. Values of the total biomass of bacterioplankton (*a*) and bacteriobenthos (*b*) by season in the waters of the Northern Caspian Sea in the area of the field named after. V. Filanovsky in 2023.

Пространственное распределение общей численности и общей биомассы бактериопланктона и бактериобентоса по сезонам было гетерогенным. Различия в динамике показателей ОЧБ и ОББ связаны с тем, что в пределах одного и того же водного объекта наблюдаются различия по морфологическому составу бактериоценоза и размеру бактериальных клеток в той или иной части акватории, что приводит к формированию микробиоценоза при сходной общей численности, но с разными значениями биомассы, которые при этом могут варьировать в гораздо более широких пределах. Однако в оба периода исследований регистрировались участки акватории со схожим распределением максимальных и минимальных значений ОЧБ и ОББ, что указывает на связь двух микробиологических показателей, но не обязательно свидетельствует о их корреляционной зависимости, т. к. биомасса бактерий рассчитывается в первую очередь на основе объемов бактериальных клеток с последующим пересчетом в весовые единицы измерения.

Сезонное распределение общей численности и общей биомассы бактериопланктона показало, что максимальные значения приходятся на северо-восточную, центральную и западную зоны исследованного участка, наиболее подверженные влиянию речного стока (рис. 4). Минимальные величины рассматриваемых показателей зарегистрированы на юго-востоке изученной акватории. При этом зоны максимума и минимума по сезонам зафиксированы в основном в одних и тех же точках.

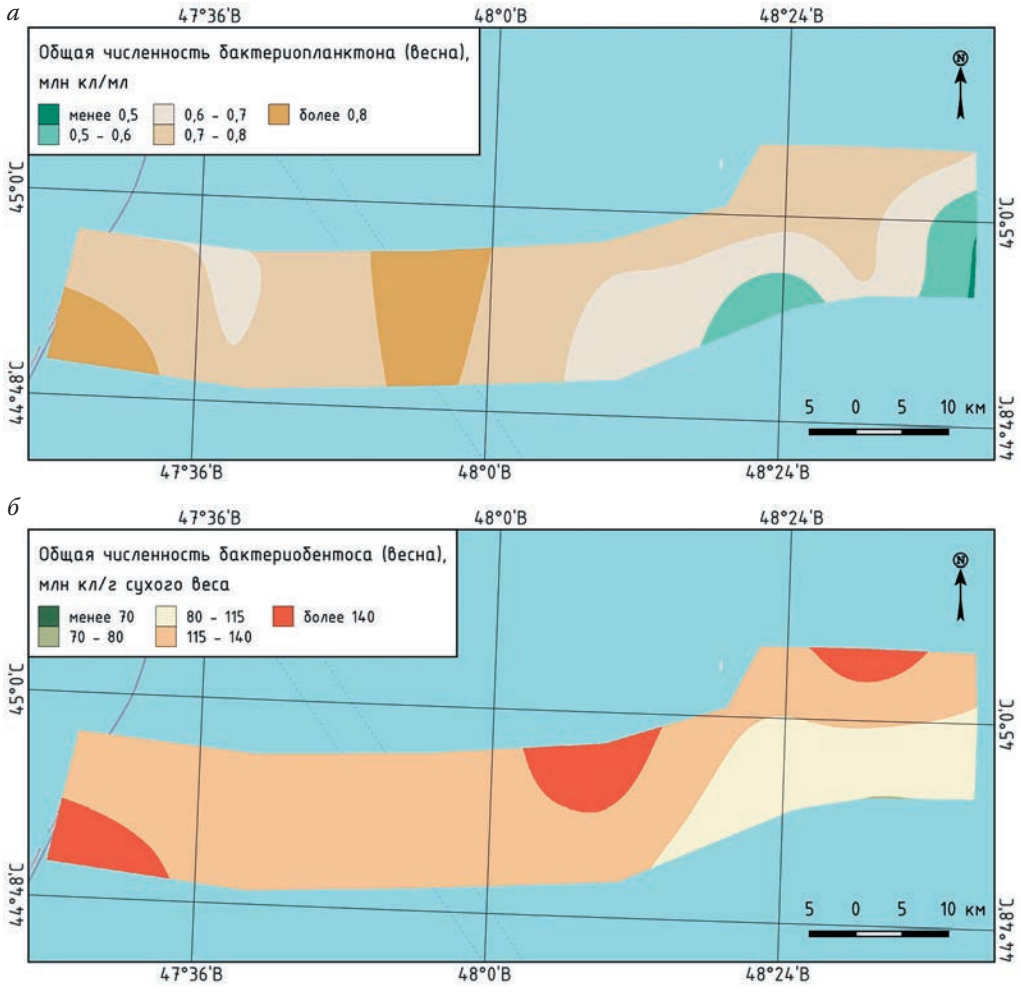


Рис. 4. Распределение общей численности бактериопланктона в акватории Северного Каспия в районе месторождения им. В. Филановского в весенний (*а*) и осенний (*б*) периоды исследований в 2023 г.

Fig. 4. Distribution of the total number of bacterioplankton in the waters of the Northern Caspian Sea in the area of the V. Filanovsky field in the spring (a) and autumn (b) periods of research in 2023.

Наибольшие значения рассматриваемых показателей в грунтах регистрировались на севере, северо-востоке и юго-западе исследованной акватории на участках с меньшей глубиной (0,9–5,0 м), что связано с формированием более благоприятных условий для развития бактерий по мере уменьшения глубин изученных участков (рис. 5). Наименьшие величины ОЧБ и ОББ в донных отложениях весной и осенью отмечены в одних и тех же более глубоководных юго-восточных (8,5 м; 9,0 м) и восточных (8,9 м) точках.

Основной вклад в ОЧБ весной и осенью в исследованной акватории месторождения составили кокковые формы (в среднем 70 %); палочковидные – около 24 %; извитые – 6 % (рис. 6). При этом вклад бактерий в ОББ для кокков

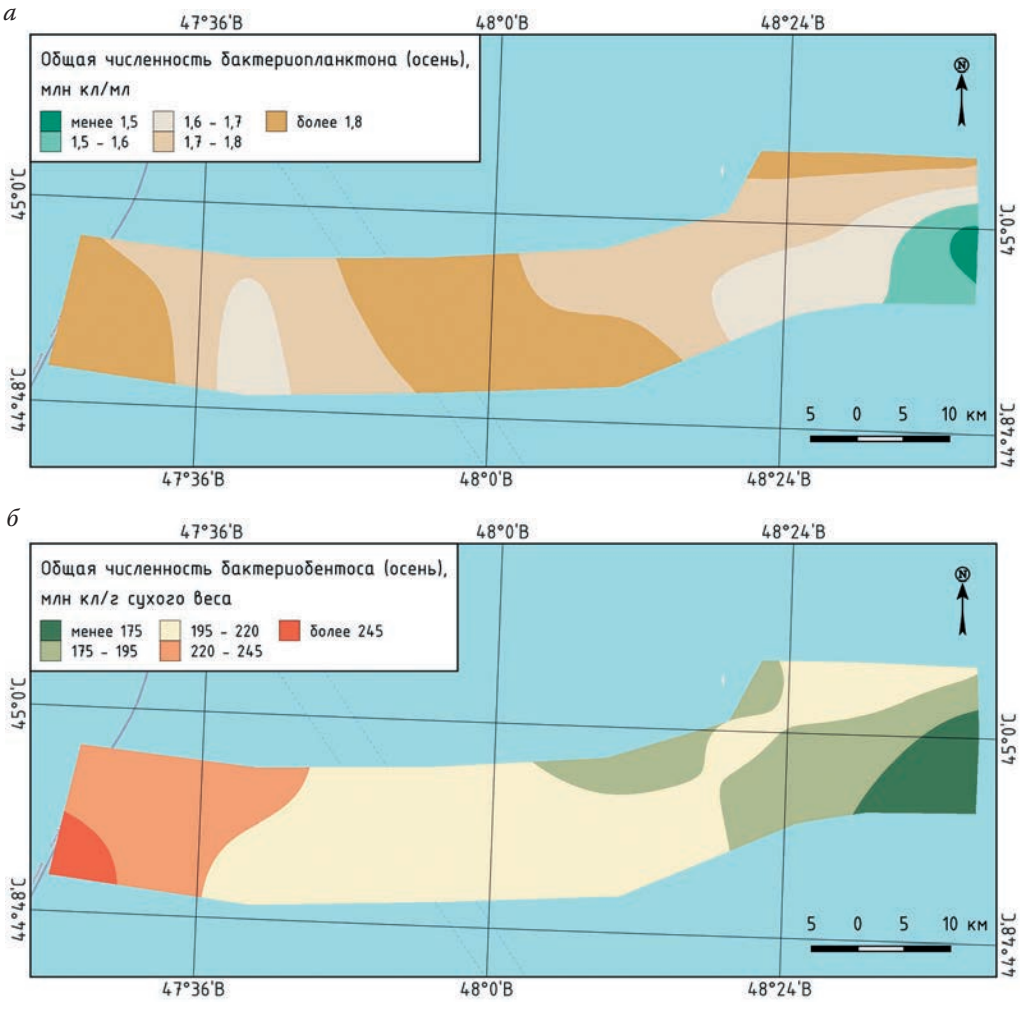


Рис. 5. Распределение общей численности бактериобентоса в акватории Северного Каспия в районе месторождения им. В. Филановского в весенний (*а*) и осенний (*б*) периоды исследований в 2023 г.

Fig. 5. Distribution of the total number of bacteriobenthos in the waters of the Northern Caspian Sea in the area of the V. Filanovsky field in the spring (*a*) and autumn (*b*) periods of research in 2023.

составлял в среднем 63 %, палочек – 30 % и вибрионов – 7 %. Данная микробиологическая картина распределения общей численности и общей биомассы бактерий по основным морфологическим группам объясняется связью двух рассматриваемых показателей в аспекте схожего процентного соотношения и вклада основных морфологических групп бактериопланктона и бактериобентоса в ОЧБ и ОББ. Однако существенного процентного изменения морфологических групп по сезонам не обнаружено, что указывает на стабильность развивающихся на месторождении микробных ценозов.

Временные изменения численности сапротрофной группы гетеротрофов в бактериопланктоне в акватории месторождения показали увеличение зна-

чений от весны к осени в 3 раза: от 62,63 ± 10,04 до 205,94 ± 53,12 тыс. кл/мл (рис. 7). Наибольшее увеличение численности отмечено на северо-востоке. В весенний период исследований количественные показатели сапротрофов варьировали от 13,00 до 110,00 тыс. кл/мл, в осенний период диапазон колебаний численности увеличивался от 25,00 до 700,00 тыс. кл/мл. При этом доля сапротрофной группы от общей численности бактериопланктона в среднем составляла 2,00–11,00 % и изменялась в достаточно широких пределах – от 2,00 до 38,00 %, что объясняется, в первую очередь, значительным естественным присутствием культивируемых сапротрофных групп в общем составе бактериоценоза в акватории месторождения в оба периода исследований. Отметим, что в осенний период диапазон варьирования был больше, вероятнее всего, за счет дисбаланса гетеротрофного бактериоценоза исследуемого водоема.



Рис. 6. Морфологические группы бактерий в акватории Северного Каспия в районе месторождения им. В. Филановского в 2023 г.
Fig. 6. Morphological groups of bacteria in the waters of the Northern Caspian Sea in the area of the field named after. V. Filanovsky in 2023.

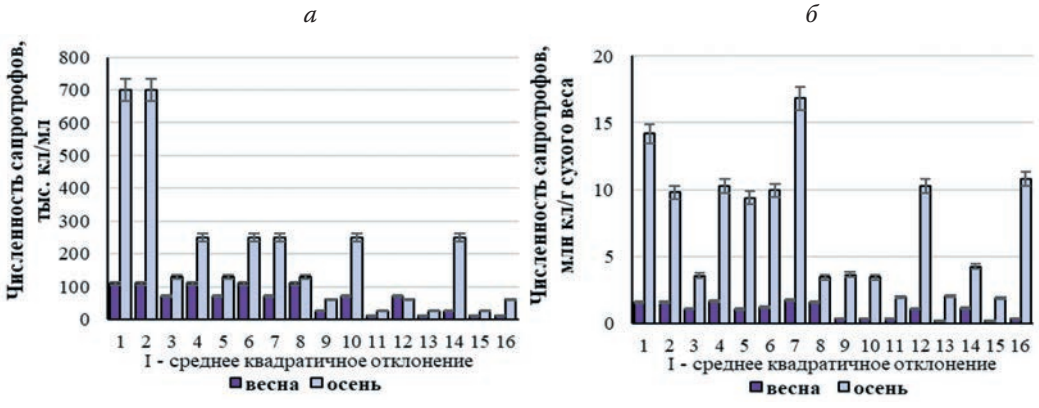


Рис. 7. Численность сапротрофной группы бактериопланктона (*а*) и бактериобентоса (*б*) (СБ) по сезонам в акватории Северного Каспия в районе месторождения им. В. Филановского в 2023 г.
Fig. 7. The number of saprotrophic group of bacterioplankton (a) and bacteriobenthos (b) by season in the waters of the Northern Caspian Sea in the area of the field named after. V. Filanovsky in 2023.

В аспекте сезонного анализа численность сапротрофной группы гетеротрофов в бактериобентосе в среднем повышалась от весны (диапазон варьирования 0,19–1,72 млн кл/г сухого веса) к осени (пределы колебаний 1,86–16,82 млн кл/г сухого веса) примерно в 7,5 раз: с 0,96 ± 0,14 до 7,22 ± 1,19 млн кл/г сухого веса (рис. 6). При этом значительное увеличение численности сапротрофов регистрировалось также на северо-востоке акватории, как и в случае бактериопланктона. Доля сапротрофной группы от общей численности бактериобентоса в среднем равнялась 0,80–3,50 % и изменялась в большом диапазоне – от 0,20 до 7,90 %, продолжая быть доминирующей над нефтеокисляющей группой в оба периода исследований. Осенью концентрация сапротрофов увеличилась значительнее по сравнению с данными бактериопланктона, что, скорее всего, связано с продолжающимися процессами минерализации органических веществ и самоочищения исследованного водоема. Также следует отметить, что изучаемая группа гетеротрофных бактерий обладает высокими темпами развития при благоприятных условиях, а донные отложения способны к аккумулированию органических и минеральных веществ, а также самих бактерий.

В пространственном отношении по сезонам также прослеживалась гетерогенность распределения численности сапротрофной группы гетеротрофов по акватории исследованного участка месторождения. Наибольшие показатели численности зарегистрированы в северной и западной частях акватории. Наименьшие значения численности сапротрофов отмечались в юго-восточных и восточных точках. Максимальные показатели численности бактериобентоса приходились на участки с меньшей глубиной (0,9–5,0 м). Минимальные значения, наоборот, отмечались в более глубоководных южных зонах исследованной акватории (8,5–9,0 м). При этом частично зоны с максимальными величинами численности сапротрофной группы бактерий совпадали с таковыми величинами ОЧБ и ОББ. Как известно, характер распределения сапротрофов по акватории определяется целым комплексом абиотических и биотических факторов, таких как гидрологические и температурные режимы, присутствие растворенного органического вещества и биогенных элементов, развитие фитопланктона. Механическое взмучивание донных отложений на мелководных участках, за счет которого в водную толщу попадают взвешенные вещества, повлияло на развитие бактерий в сторону увеличения их численности, в отличие от полученных данных в более мористой части изученной акватории, где на распределение бактерий повлиял другой комплекс факторов.

Численность нефтеокисляющей группы гетеротрофов в морской воде акватории месторождения в сезонном аспекте также повышалась в осенний период и в среднем находилась на уровне нескольких тыс. кл/мл. В оба периода исследований доля нефтедеструкторов от ОЧБ составляла в среднем 1,60–3,00 %, варьируя от 0,10 до 6,20 %, что свидетельствует о преобладании сапротрофной группы гетеротрофов, характерном для бактериоценозов Северного Каспия. Количественные значения нефтеокисляющих бактерий в донных отложениях также повышались осенью. Как и в случае бактериоплан-

ктона, сапротрофный бактериобентос доминировал над нефтеокисляющим. Доля нефтедеструкторов от ОЧБ в среднем равнялась 0,06–0,50 %, варьируя в меньших пределах – от 0,01 до 0,90 %.

Пространственное распределение нефтеокисляющих бактерий по сезонам было мозаичным. В основном нефтедеструкторы концентрировались на северо-востоке изученной акватории. Минимальные зоны численности зарегистрированы в западной части, где в большей степени встречалась сапротрофная группа гетеротрофов. Снижение концентрации нефтеокисляющих бактерий на фоне возрастающей численности сапротрофов, возможно, связано с наличием в прибрежной зоне субстрата, необходимого для развития данной группы гетеротрофов. Таким образом, сапротрофная группа в морской воде характеризовалась снижением численности по направлению от берега в более мористые районы исследованного участка, в то время как численность нефтедеструкторов демонстрировала обратное распределение.

Исследование состояния бактериопланктона и бактериобентоса в районе месторождения им. В. Филановского в Каспийском море весной и осенью 2023 г. показало соответствие полученных данных изучаемых микробиологических показателей диапазонам фондовых литературных данных [9, 14, 21–24]. Анализ временной динамики исследуемых бактериоценозов выявил изменение рассматриваемых показателей в сезонном аспекте: наблюдается их увеличение от весны к осени. Следует отметить, что изучаемые микроценозы, как биологические сообщества Каспийского моря, подвержены не только межсезонными колебаниям, но также и межгодовым изменениям.

Полученные значения общей численности и общей биомассы бактерий, а также численности сапротрофной и нефтеокисляющей групп гетеротрофов в акватории Северного Каспия, в районе месторождения им. В. Филановского, в весенний период исследований обусловлены гидрологическими и температурными особенностями сезона. Весной отмечены небольшие попуски воды с Волгоградского гидроузла в низовья Волги (41 км^3), раннее половодье привело к незначительному поступлению аллохтонных микроорганизмов и органических веществ в исследуемую акваторию; температура воздуха составляла 16–21 °С, температура морских вод 16–19 °С. В целом абиотические факторы повлияли на количественное развитие микроорганизмов и дальнейшее поступление их в акваторию северной части Каспийского моря в весенний период проведенных исследований. Осенью попуски воды увеличились до 92 км^3, что привело к большему поступлению аллохтонных микроорганизмов и органических веществ в исследуемую акваторию. В осенний период температура воздуха составляла 20–21 °С, температура морских вод 15–22 °С. Сформировавшийся прогрев водных масс, а также продолжающиеся процессы минерализации органических веществ и самоочищения исследуемого водоема в осенний период обеспечили более активное развитие бактериоценоза осенью в акватории месторождения.

Средние значения показателя ОЧБ в весенний период указывали на «олигосапробность» вод месторождения («чистые воды» по ГОСТ 17.1.2.04–77,

II класс качества вод по ГОСТ 17.1.3.07–82). Осенью данный показатель немного ухудшился, и воды по данному показателю характеризовались как «бетамезосапробные» («загрязненные воды» по ГОСТ 17.1.2.04–77, III класс качества вод, «умеренно загрязненные воды» по ГОСТ 17.1.3.07–82). Отметим, что качество исследуемых вод определялось в большей степени поступлением аллохтонных микроорганизмов на исследуемую акваторию с речным стоком, а также формированием благоприятных условий для развития бактерий в морской воде в акватории месторождения за счет сезонных гидрологических и температурных особенностей.

Средние значения численности сапротрофов в весенний период характеризуют среду их обитания как «полисапробную» («грязные воды» согласно ГОСТ 17.1.2.04–77, V класс качества вод согласно ГОСТ 17.1.3.07–82). В осенний период по этому же показателю сапробность среды характеризовалась, как «гиперсапробная» («грязные воды» согласно ГОСТ 17.1.2.04–77, VI класс качества вод согласно ГОСТ 17.1.3.07–82), что указывает на наличие достаточного количества лабильного органического вещества на акватории исследуемого полигона для развития сапротрофной группы гетеротрофов и связано с их метаболизмом. При этом следует указать на многократное превышение (весной – в 9 раз, осенью – в 28 раз) значений численности сапротрофов на станциях мелководной прибрежной акватории над показателями, определенными на станциях в более мористой юго-восточной части, где качество вод по ГОСТ 17.1.2.04–77 определено как «альфамезосапробные воды», IV класс качества вод согласно ГОСТ 17.1.3.07–82.

Привносимые в изучаемую акваторию биогенные элементы и их формы, влияющие на трофический статус водоема, в период проведения исследования не превышали $ПДК_{рх}$ и существенно не отклонялись от фоновых показателей, определяемых литературными данными [27, 28]. Так, концентрация фосфора фосфатов составляла до 0,021 мг/дм^3, общего фосфора – до 0,133 мг/дм^3. Концентрация аммонийного азота достигала 1,79 мг/дм^3, нитритного – 0,0122 мг/дм^3, нитратного – 0,036 мг/дм^3, общего азота – 2,37 мг/дм^3. Содержание растворенного кремния в основном находилось на уровне 0,5 мг/дм^3. При этом средние значения фосфора фосфатов, общего азота и его аммонийных и нитратных форм увеличивались в осенний период, что возможно также повлияло на развитие изучаемого бактериоценоза.

Для изученного участка месторождения характерна высокая изменчивость содержания взвешенных веществ за счет малых глубин. Максимальные концентрации взвешенных веществ в основном приурочены к участкам с наименьшими глубинами, где более выражено ветро-волновое воздействие, которое приводит к взмучиванию донных грунтов, переходящих во взвешенное состояние. При этом исследованная акватория приурочена к части Каспийского моря, сильно подверженной влиянию Волжского стока, обусловливающего высокое содержание взвеси. Также для изученной акватории участка месторождения не характерно загрязнение органическими поллютантами, в

первую очередь нефтепродуктами: их содержание в морских водах во время всех периодов исследования соответствовало нормативам качества вод для водоемов рыбохозяйственного значения. Содержание большинства металлов (меди, марганца, свинца, ртути, бария и кадмия) было ниже соответствующих нормативных значений.

Концентрация сапротрофной группы бактерий по отношению к нефтеокисляющей была выше как в морской воде, так и в донных отложениях в оба периода исследования. Доля нефтедеструкторов при этом от ОЧБ была небольшой, что свидетельствует о смещении в сторону преобладания сапротрофов. Пространственное распределение исследуемых групп гетеротрофов в изученной акватории в основном определялось комплексом абиотических и биотических факторов, а также было связано с особенностями питания и метаболизма рассмотренных групп бактерий.

Таким образом, в ходе проведенного анализа сезонной динамики биологических сообществ бактериопланктона и бактериобентоса в акватории Северного Каспия в районе месторождения им. В. Филановского в 2023 г. в рамках экологического мониторинга отмечено увеличение рассматриваемых показателей от весны к осени. Наблюдаемые изменения микробиологических параметров связаны в большей степени с сезонными условиями и ветро-волновым воздействием, поэтому подвержены постоянным колебаниям. Пространственное распределение было весьма гетерогенным и зависело в основном от целого комплекса гидрологических факторов водной среды, а также особенностей развития изучаемых групп бактерий.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного анализа динамики микробных сообществ в условиях активной хозяйственной деятельности в акватории Северного Каспия, в районе месторождения им. В. Филановского, в 2023 г. в рамках экологического мониторинга установлено, что, несмотря на активную хозяйственную деятельность в исследованной акватории, изученный гетеротрофный бактериоценоз северной части Каспийского моря относится к «устойчивому и естественному», соответствующему уровню природного фона и определяется в большей степени процессами взмучивания, особенностями метаболизма изученных групп гетеротрофов и сезонными условиями периодов проведенных исследований.

Качество вод исследуемой акватории месторождения как по средним показателям ОЧБ, так и по средним величинам численности сапротрофов ухудшилось осенью, что в основном определяется значительным привнесением органического вещества и аллохтонных бактерий в изучаемую акваторию за счет больших попусков воды с Волгоградского гидроузла в низовья Волги, а также ветро-волновым воздействием. Сформировавшийся прогрев водных масс, а также продолжающиеся процессы минерализации органических веществ и самоочищения исследованного водоема в осенний период обеспечили более активное развитие бактериоценоза осенью в изученной акватории участка месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. The Caspian Sea Environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2005. 271 p.
2. Абдусамадов А.С. Проблемы и приоритетные направления сохранения биологических ресурсов Западной части Среднего и Северного Каспия // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2008. № 1(2). С. 30–34.
3. Макарова Е.Н., Монахов С.К., Попова Н.В. Влияние природных и антропогенных факторов на состояние биологических сообществ Северного Каспия. Астрахань: Индивидуальный предприниматель Сорокин Роман Васильевич (Издатель: Сорокин Роман Васильевич), 2016. 318 с.
4. Конев С.В., Баканева А.А. Современное состояние водной экологической системы Волго-Ахтубинской поймы как результат антропогенного воздействия // Итоги и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 356–362.
5. Zonn I.S., Kostianoy A.G., Kosarev A.N., Glantz M. The Caspian Sea Encyclopedia. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2010. 527 p.
6. Курапов А.А., Зубанов С.А., Попова Н.В., Умербаева Р.И. Разработка стратегии сохранения биоразнообразия в районах деятельности ООО «Каспийская нефтяная компания» в Северном Каспии // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 5(53). С. 73–83.
7. Cole J.J., Findlay S., Pace M.L. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: A cross-system overview // Marine Ecology Progress Series. 1988. Vol. 43. P. 1–10.
8. Авчинников А.В. Микробное загрязнение водной среды и его влияние на заболеваемость населения // Медицинская консультация. 2000. № 2. С. 43–47.
9. Баубекова Д.Г., Кирюхина Е.Р. Оценка санитарно-микробиологического состояния среды обитания водных биологических ресурсов северной части Каспийского моря // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2023. № 5. С. 286–296.
10. Олейник Г.Н. Бактериопланктон и бактериобентос в экотонных экосистемах // Гидробиологический журнал. 1997. Т. 33 (2). С. 51–62.
11. Ильинский В.В., Комарова Т.И., Семененко М.Н. Микробиологический мониторинг морской среды на структуре «Центральная» в весенний период 2005 г. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. № 11. С. 26–32.
12. Нетрусов А.И. Экология микроорганизмов. М.: Издательство «Юрайт», 2022. 267 с.
13. Карыгина Н.В., Проскурина В.В., Лардыгина Е.Г., Дегтярева Л.В., Кравченко Е.А., Головатых Н.Н., Галлей Е.В., Дьякова С.А., Шокашева Д.И. Абиотические и биотические факторы, формирующие условия обитания биоресурсов Каспийского моря // Сохранение биологических ресурсов Каспия. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2014. С. 210–214.
14. Менькова А.В., Баубекова Д.Г., Дьякова С.А., Галяутдинова Е.Р. Мониторинг углеводородокисляющих бактерий воды и донных отложений на лицензированном участке «Северный» // Материалы VII научно-практической конференции с международным участием «Проблемы сохранения экосистемы Каспия в условиях освоения нефтегазовых месторождений» (18 октября 2019 г., Астрахань). Астрахань: Волжско-Каспийский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ»). 2019. С. 100–104.
15. Вербина Н.М. Гидромикробиология. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
16. Салманов М.А. Роль микрофлоры и фитопланктона в продукционных процессах Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 213 с.
17. Сокольский А.Ф., Винникова В.Н., Петровичева Е.В., Умербаева Р.И., Сокольская Е.А., Абдурахманов Г.А., Панков А.Г. Многолетние изменения в состоянии микрофлоры и оценка трофического статуса Северного Каспия // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2008. № 7. С. 46–49.
18. Умербаева Р.И., Саркисян Н.А., Зубанов С.А., Исмагулова А.Л. Динамика планктонных и бентосных сообществ в районе месторождения им. Ю. Корчагина на Северном Каспии // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2011. № 10. С. 48–54.

19. Колотова О.В., Соколова И.В., Владимцева И.В., Шмелева Е.О., Водовский Н.Б. Бактериальные сообщества пелагиали и донных отложений Северного Каспия в 2015–2016 гг. // Юг России: экология, развитие, 2017. Т. 12. № 4. С. 120–137.
20. Теппер Е.З. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2004. 256 с.
21. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / ред. В.А. Абакумов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 317 с.
22. Hoff K.A. Total and specific bacterial counts by simultaneous staining with DAPI and flourochrome-labeled antibodies // Handbook of methods in aquatic microbial ecology. 1993. P. 149–154.
23. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии. М: Академия. 2005. 608 с.
24. Романова Н.Д., Сажин А.Ф. Взаимосвязь между объемом бактериальных клеток и содержанием в них углерода // Океанология, 2010. Т. 50. № 4. С. 556–565.
25. Лялин В.С., Зверева И.Г., Никифорова Н.Г. Статистика: теория и практика в Excell: учеб. пособие для вузов. М.: Финансы и статистика: Инфра–М, 2010. 448 с.
26. Новиков Д.А., Новочадов В.В. Статистические методы в медико-биологическом эксперименте (типовые случаи). Волгоград: Изд-во ВолГМУ, 2005. 84 с.
27. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2019 / под ред. А.Н. Коршенко М.: Наука, 2020. 200 с.
28. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2020 / под ред. А.Н. Коршенко М.: Наука, 2021. 230 с.

REFERENCES

1. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. The Caspian Sea Environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2005. 271 p.
2. Abdusamadov A.S. Problems and priority directions for the conservation of biological resources in the Western part of the Middle and Northern Caspian. *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 2008. No. 1 (2). P. 30–34 (In Russ.).
3. Makarova E.N., Monakhov S.K., Popova N.V. Influence of natural and anthropogenic factors on the state of biological communities of the Northern Caspian. Individual entrepreneur Sorokin Roman Vasilyevich, Astrakhan, 2016. 318 p. (In Russ.).
4. Konev S.V., Bakaneva A.A. The current state of the water ecological system of the Volga-Akhtuba floodplain as a result of anthropogenic impact. In: Results and prospects for the development of the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference. 2018. P. 356–362 (In Russ.).
5. Zonn I.S., Kostianoy A.G., Kosarev A.N., Glantz M. The Caspian Sea Encyclopedia. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2010. 527 p.
6. Kurapov A.A., Zubanov S.A., Popova N.V., Umerbaeva R.I. Development of a biodiversity conservation strategy in the areas of operation of LLC «Caspian Oil Company» in the Northern Caspian. *Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2019. No. 5 (53). P. 73–83 (In Russ.).
7. Cole J.J., Findlay S., Pace M.L. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: A cross-system overview. *Marine Ecology Progress Series*. 1988. Vol. 43. P. 1–10.
8. Avchinnikov A.V. Microbial pollution of the aquatic environment and its impact on the incidence of the population. *Medical consultation*. 2000. No 2. P. 43–47 (In Russ.).
9. Baubekova D.G., Kiriukhina E.R. Assessment of the sanitary and microbiological state of the habitating environment of water biological resources in the northern part of the Caspian sea. *Fish farming and fishery*. 2023. No 5. P. 286–296 (In Russ.).
10. Oleinik G.N. Bacterioplankton and bacteriobenthos in ecotone ecosystems. *Hydro/biological Journal*. 1997. Vol. 33 (2). P. 51–62 (In Russ.).
11. Ilyinsky V.V., Komarova T.I., Semenenko M.N. Microbiological monitoring of the marine environment at the Central structure in the spring of 2005. *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2006. No 11. P. 26–32 (In Russ.).
12. Netrusov A.I. Ecology of microorganisms. M.: Publishing house «Urayt», 2022. 267 p. (In Russ.).
13. Karygina N.V. Proskurina V.V., Lardygina E.G., Degtyareva L.V., Kravchenko E.A., Golovatykh N.N., Galley E.V., Dyakova S.A., Shokasheva D.I. Abiotic and biotic factors that form the living

conditions of the bioresources of the Caspian Sea. *Preservation of biological resources of the Caspian Sea*. Astrakhan: Publishing House of ASTU, 2014. P. 210–214 (In Russ.).
14. Men'kova A.V., Baubekova D.G., Dyakova S.A., Galyautdinova E.R. Monitoring of hydrocarbon-oxidizing bacteria in water and bottom sediments at the licensed area «Severny». *Problems of conservation of the Caspian ecosystem in the conditions of development of oil and gas fields*. Astrakhan: Volga-Caspian branch of FGBNU «VNIRO» («CaspNIRKH»). 2019. P. 100–104 (In Russ.).
15. Verbina N.M. Hydro/microbiology. M.: Food industry, 1980. 288 p. (In Russ.).
16. Salmanov M.A. The role of microflora and phytoplankton in production processes of the Caspian Sea. M: Nauka, 1987. 213 p. (In Russ.).
17. Sokolsky A.F., Vinnikova V.N., Petrovicheva E.V., Umerbaeva R.I., Sokolskaya E.A., Abdurakhmanov G.A., Pankov A.G. Long-term changes in the state of microflora and assessment of the trophic status of the Northern Caspian. *Environmental protection in the oil and gas complex*, 2008. No. 7. P. 46–49 (In Russ.).
18. Umerbaeva R.I., Sargsyan N.A., Zubanov S.A., Ismagulova A.L. Dynamics of planktonic and benthic communities in the Y. Korchagina deposit area in the Northern Caspian. *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2011. No. 10. P. 48–54 (In Russ.).
19. Kolotova O.V., Sokolova I.V., Vladimtseva I.V., Shmeleva E.O., Vodovsky N.B. Bacterial communities of the pelagic zone and bottom sediments of the Northern Caspian in 2015–2016. *South of Russia: ecology, development*. 2017. Vol. 12. No. 4. P. 120–137 (In Russ.).
20. Tepper E.Z. Workshop on microbiology. M.: Bustard, 2004. 256 p. (In Russ.).
21. Guide to hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems / ed. V.A. Abakumov. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 317 p. (In Russ.).
22. Hoff K.A. Total and specific bacterial counts by simultaneous staining with DAPI and flourochrome-labeled antibodies. Handbook of methods in aquatic microbial ecology. 1993. P.149–154.
23. Netrusov A.I. Workshop on microbiology. M: Academy. 2005. 608 p. (In Russ.).
24. Romanova N.D., Sazhin A.F. The relationship between the volume of bacterial cells and their carbon content. *Oceanology*, 2010. Vol. 50. No 4. P. 556–565. (In Russ.).
25. Lyalin V.S., Zvereva I.G., Nikiforova N.G. Statistics: theory and practice in Excell: textbook: allowance for universities. M.: Finance and statistics: Infra-M, 2010. 448 p. (In Russ.).
26. Novikov D.A., Novochadov V.V. Statistical methods in biomedical experiment (typical cases). Volgograd: Publishing House of VolGMU, 2005. 84 p. (In Russ.).
27. Seawater quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2019. Ed. Korshenko A.N. M.: Nauka, 2020. 200 p. (In Russ.).
28. Seawater quality by hydrochemical indicators. Yearbook 2020. Ed. Korshenko A.N. M.: Nauka, 2021. 230 p. (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.
Financing. The study was not sponsored.

Сведения об авторах:

Баубекова Динара Гайдаровна, главный специалист сектора гидробиологических, микробиологических и ихтиологических исследований, Геоэкологический центр «Изыскания. Проектирование. Мониторинг», Россия, 117246, Москва, Научный проезд, д. 17; https://orsid.org/0000–0002–3288–9487; e-mail: info@gcipm.ru

Колмыков Евгений Валерьевич, канд. биол. наук, начальник отдела экологии, ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», Россия, 414000, г. Астрахань, ул. Адмиралтейская, д. 1, корп. 2; e-mail: evgeny.kolmykov@lukoil.com

Мелик-Багдасаров Евгений Михайлович, канд. геогр. наук, исполнительный директор, Геоэкологический центр «Изыскания. Проектирование. Мониторинг», Россия, 117246, г. Москва, Научный проезд, д. 17; e-mail: info@gcipm.ru

About the authors:

Dinara G. Baubekova, Chief Specialist, Hydrobiological, microbiological and ichthyological research sector, Center of Geo/ecology «Survey. Designing. Monitoring» Ltd. Nauchny proezd, 17, Moscow, 117246, Russia; https://orsid.org/0000–0002–3288–9487; e-mail: info@gcipm.ru.

Evgeniy V. Kolmykov, Candidate of Biological Sciences, head of the ecology department of LUKOIL-Nizhnevolzhskneft, ul. Admiralteyskaya, 1, bldg. 2, Astrakhan, 414000, Russia; e-mail: evgeny.kolmykov@lukoil.com

Evgeniy M. Melik-Bagdasarov, Candidate of Geographic Sciences, Executive Director Center of Geo/ecology «Survey. Designing. Monitoring» Ltd. Nauchny proezd, 17, Moscow, 117246, Russia; e-mail: info@gcipm.ru

Поступила в редакцию / Received 30.10.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 17.01.2024.
Принята к публикации / Accepted 27.01.2025.

УДК 556.08 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-118-130*

Экологическое состояние Воронежского водохранилища
(обзор научных публикаций)

А.А. Елисеев ✉, К.Ю. Силкин

✉ eliseev.36@yandex.ru

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье представлен обзор научных публикаций об экологических проблемах Воронежского водохранилища. Изучению вопросов, связанных с нарушением химической, микробиологической и биотической обстановки на водоеме, влияющей на благополучие жизнедеятельности населения Воронежа, было посвящено немало статей, докладов на научно-практических конференциях, монографий и диссертаций. Однако этой обширной информации еще не хватает комплексного подхода к решению всего спектра проблем, касающихся компонентов экогеосистемы Воронежского водохранилища. **Методы.** Авторами предпринята попытка проанализировать публикации, основанные на результатах научных исследований водоема, а также предложить варианты решения экологических проблем. **Результаты.** Данный обзор может быть полезным не только при планировании дальнейших работ по изучению состояния Воронежского водохранилища, но и при подготовке практических мероприятий по его улучшению.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Воронежское водохранилище, экологическое состояние, качество природной среды, поверхностные воды, экосистема, нарушение ПДК, «цветение» воды.

Для цитирования: Елисеев А.А., Силкин К.Ю. Экологическое состояние Воронежского водохранилища (обзор научных публикаций) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 118–130. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-118-130, EDN: NWNWDS

Ecological status of Voronezh reservoir
(review of scientific publications)

Alexandr A. Eliseev ✉, Konstantin Y. Silkin

✉ const.silkin@yandex.ru

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. The article presents the broad overview of scientific publishing related to ecological problems of Voronezh reservoir. Issues connected with chemical, microbiological, biotic and other problems of this reservoir that impact the Voronezh population well-being were discussed in many monographs, articles, and reports at scientific conferences. Also, there are many scientific publications, reports, monographs and dissertations that were dedicated to health and well-being of population of Voronezh city. However, this comprehensive information still lacks integrated approach to solution of the whole range of problems related to the Voronezh reservoir eco/geo/system components. **Methods.** The authors tried to analyze publications

© Елисеев А.А., Силкин К.Ю., 2025.

based on the water body scientific researches outcomes, and to propose their own versions of environmental problems' solution. **Results**. This review can be helpful not only in further planning on the Voronezh reservoir status research but in preparing practical measures on its improving.

KEYWORDS: Voronezh reservoir, ecological status, quality of environment, well-being of life, surface waters, ecosystem, violation of maximum permissible concentrations, algal blooms.

For citation: A.A. Eliseev, K.Y. Silkin. Ecological status of Voronezh reservoir (review of scientific publications). *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 1. P. 118–130. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-118-130, EDN: NWNWDS

ВВЕДЕНИЕ

С момента создания Воронежского водохранилища в научной литературе появилось большое число публикаций, посвященных его экологическому состоянию. Так, по данным научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU с 1996 г. под рубриками «экология» и «охрана окружающей среды» по тематике Воронежского водохранилища опубликовано в научном журнале «Вестник Воронежского государственного университета» в серии «География. Геоэкология» – 14 статей, в серии «Геология» – 9. Среди 394 результатов поиска в том же каталоге eLIBRARY.RU, удовлетворяющих заданному критерию, 46 % – это материалы разнообразных научных конференций, 35 % – статьи и 19 % – книги.

Из последних стоит отметить сборники «Безопасность Воронежского водохранилища» (2005 г.) [1] и «Приоритетные направления экологической реабилитации Воронежского водохранилища» (2012 г.) [2]. Монография [3] содержит обобщение проблем загрязнения воды и донных отложений, а также данные о трансформации ложа водоема, однако малый тираж и недоступность в электронном виде не позволили ей стать достоянием широкой научной общественности.

При внимательном анализе нового материала и прежних публикаций становится очевидной существенная фрагментарность этого массива данных. Иными словами, системного подхода к изучению экологических проблем Воронежского водохранилища все еще не хватает.

Настоящая статья посвящена систематизации научных знаний по экологической проблематике Воронежского водохранилища. В контексте этого исследования к экологическим вопросам отнесены оценки гидрохимического и микробиологического состояния компонентов экогеосистемы акватории (поверхностных и подземных вод, вмещающих их элементов геологической среды), проявляющиеся в изменении химических и биотических показателей, а также в нарушении благополучия жизнедеятельности населения Воронежа.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Воронежское водохранилище – крупнейший в России искусственный водоем, расположенный целиком в пределах одного городского округа. Этой уникальной особенностью во многом обусловлены и связанные с ним экологические проблемы.

Причиной создания водохранилища стали увеличившиеся в середине прошлого столетия потребности местного населения в питьевой и технической воде. В 1964 г. началось проектирование водохранилища, 31 марта 1972 г. было завершено его строительство, и уже к концу апреля уровень воды в чаше водоема достиг проектной отметки [4].

Воронежское водохранилище расположено в нижнем течении р. Воронеж в пределах одноименного города. Общая протяженность водоема с севера на юг составляет около 35 км, ширина – 2 км, средняя глубина – 2,6 м, максимальная – 19 м, общий объем – 204 млн м^3, полезный объем – 160 млн м^3. Наибольший сезонный подъем воды – около 8 м. Питание водохранилища происходит за счет поступления осадков, преимущественно в весенний период. Основные источники питания водоема – атмосферные осадки, приток водной массы из р. Воронеж и поверхностные стоки [5].

В Воронежском водохранилище есть два вида течений – стоковые и ветровые. Скорость первых зависит от количества воды в водоеме. Средняя скорость течений составляет 2,3 м/с в верхней зоне, 0,31 м/с – в средней зоне и 0,19 м/с – в нижней зоне. Скорость течений в период среднего половодья увеличивается на 15–20 %.

По макрокомпонентному составу воды Воронежского водохранилища преимущественно относятся к гидрокарбонатно-хлористо-кальциево-магниевым, а также смешанного катионного и анионного состава. Средняя минерализация воды составляет от 0,3 до 0,65 г/м^3. [5].

Воронежское водохранилище разделено на гидрогеологические районы: приплотинный, промежуточный, южный и северный. Их границами служат дамбы транспортных мостов. Различие районов заключается в их географическом положении и степени антропогенной нагрузки. Из-за отсутствия промышленных предприятий на близлежащей территории и наличия жесткой растительности на правобережных склонах наиболее чистым является верхний (северный) участок водохранилища. По причине сбросов малоочищенных сточных вод с Левобережных очистных сооружений и наличия залива с малым течением – Масловского затона – наиболее загрязнен нижний приплотинный участок [6].

Город Воронеж расположен в Восточно-Европейском гидрогеологическом районе, Воронежском гидрогеологическом блоке, в юго-восточной части Московского артезианского бассейна. Движение грунтовых вод определяется дренирующим воздействием р. Воронеж. Утвержденные запасы пресных подземных вод на участке города по категориям А+В+С1 составляют 676 тыс. м^3/сут. [7].

Московский артезианский бассейн подразделяется на три гидрогеологических этажа: верхнеэоцен-четвертичный, меловой и докембрийско-девонский. Основными в водоснабжении являются воды четвертичного и неогенового комплексов, в меньшей мере – нижнемелового и девонского. При этом воды, связанные с четвертичным водоносным комплексом, характеризуются низкой защищенностью от химического и бактериологического загрязнения [8]. Но именно неоген-четвертичный водоносный горизонт используется для пи-

тьевого водоснабжения населения Воронежа. От 20 до 60 % массы воды питьевых водозаборов поступает из Воронежского водохранилища [9, 10]. Около 98 % населения Воронежа используют централизованный источник водоснабжения из этого водоносного горизонта [11].

Одним из наиболее важных критериев отбора публикаций (в рецензируемых научных изданиях) являлось наличие в них схем, графиков, таблиц и статистических данных и т. п. по результатам экспериментальных исследований поверхностных вод и донных отложений и других компонентов экогеосистемы на предмет выявленных нарушений по различным оценочным показателям. Такой подход позволяет не только составить обзор изученности экосистемы и геодинамических процессов Воронежского водохранилища, но и сформулировать конкретные рекомендации для разработки методики решения выявленных проблем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблемы Воронежского водохранилища происходят во многом из-за отсутствия мероприятий по очистке дна водоема еще на стадии его строительства. В результате началось гниение донных отложений, зарастание ложа водоема и развитие цианобактерий [12]. К современным проблемам относятся антропогенные загрязнения, причины которых – неудовлетворительное качество очистных сооружений и промышленные сбросы [11]. Основным источником промышленного загрязнения Воронежского водохранилища являются Левобережные очистные сооружения (ЛОС), где применяется устаревавшая технология очистки воды. Оборудование предприятия не рассчитано на современную нагрузку [13]. Причина вторичного загрязнения – поверхностные городские стоки водосборных территорий Воронежа. После выпадения осадков с потоком воды они привносят в водоем осадки выхлопных газов, антигололедных смесей, твердый бытовой мусор и другие загрязняющие вещества с поверхности водосбора [14].

Продукты сброса сточных вод, а также нитриты, нитраты и другие соединения азота являются питательными веществами для цианобактерий, в т. ч. вида *Microcystis aeruginosa,* что стимулирует их развитие. «Цветение» воды воздействует не только на водную среду, но и на атмосферу. Цианотоксины негативно влияют на организм человека, способны вызвать серьезные аллергии, отравления и другие заболевания [15].

Помимо антропогенного, существуют и геодинамические факторы, ухудшающие качество поверхностных вод. С экзогенными геологическими процессами связано накопление песчаного материала из поверхностных стоков и ливневой канализации, которое приводит к обмелению водоема, появлению наносов и отмелей. Другой не менее важной геодинамической проблемой является эрозия берега, вызывающая смыв грунта на склонах [3].

В результате воздействия вышеперечисленных факторов в акватории водоема выше уровня воды появляются новые участки суши, которые способствуют заилению и увеличению мелководных зон. Это приводит к сокращению площади водохранилища и снижению скорости течения воды, а также ослаб-

лению самоочищения водоема. В результате распространения мелководных зон повышается прогреваемость, вода начинает застаиваться, в ней развиваются цианобактерии, появляется «цветение» водоема [16].

Третья проблема – это разрастание жесткой растительности в северной части водохранилища, способствующее заболачиванию, которое, по прогнозам, в ближайшие 17 лет приведет к полному зарастанию верховья водоема до Отроженского железнодорожного моста [17, 18].

В период многолетнего мониторинга Воронежского водохранилища было выявлено большое количество экологических и эпидемиологических нарушений. На основе изученной литературы создана хронология этих нарушений, которая представлена в табл. 1.

Для своевременного выявления проблем и их устранения необходимо создание системы комплексного мониторинга акватории Воронежского водохранилища, который даст возможность объективно оценить ее состояние. На этот счет многие авторы формулируют свои предложения, например сочетать наземные исследования со спутниковыми наблюдениями [12]. Основным достоинством последних является возможность оценить изменения водного объекта в течение длительного времени. Однако для более точных измерений в конкретный период необходимо применять наземные наблюдения, в ходе которых изучать несколько компонентов экосистемы, например, поверхностные воды, донные отложения, жесткую растительность и т. п. Также требуется исследовать несколько источников загрязнения, например промышленные сбросы и популяцию фитопланктона. Далее следует провести корреляцию полученных значений и сделать выводы по состоянию экосистемы наблюдаемого объекта.

Так, при мониторинге развития популяции фитопланктона необходимо сочетать совокупность спутниковых наблюдений с наземными исследованиями с целью фотофиксации «цветения» воды. Спутниковые многозональные снимки с помощью инфракрасного излучения позволяют обнаружить скопления фитопланктона из-за его способности отражать хлорофилл. Количество фитопланктона можно отразить в виде числовых значений с помощью методики расчета нормализованного относительного альгоиндекса (NDAI). Это позволит провести объективную оценку временных изменений в водоеме, а также сравнить эти показатели с данными, полученными на других водоемах. Однако для наибольшего эффекта мониторинга «цветения» воды необходимо задействовать наземные методы исследования и фотофиксацию с цветовым индикатором [17]. По результатам мониторинга составляются прогнозы будущего состояния экосистемы, формулируются предложения по их устранению.

При отсутствии комплексного мониторинга полученные односторонние данные могут не полностью отражать объективную реальность, и оценка экологического состояния наблюдаемого объекта окажется ошибочной. Например, для числового представления биологического анализа поверхностных вод был введен индекс сапробности Пантле – Букка в модификации В. Сладечека. Он успешно применялся с 1988 по 2003 г. для определения клас-

Таблица 1. Хронология выявленных экологических нарушений на акватории Воронежского водохранилища
Table 1. Chronology of the revealed environmental infringements on the water area of Voronezh reservoir

Год	Участок водохранилища	Выявленное нарушение
1971	Окружной мост	Азот аммонийный и нитритный составляют значения от 2–9 ПДК (предельно допустимая концентрация), нефтепродукты – 15,8 ПДК [5]
1977	Окружной мост	Индекс загрязнения воды (ИЗВ) – 7,89 [5]
1987	Окружной мост	ИЗВ – 5,91 (5-й класс качества воды «грязная») [5]
1989	Плотина гидроузла	ИЗВ – 7,43, (6-й класс «очень грязная») [5]
1976, 1987–1990	Акватория Воронежского водохранилища	Массовое вымирание рыбы из-за ежесуточного поступления более 250 тыс. м^3 неочищенных стоков [5]
1988–2003	Левобережные очистные сооружения	«Очень грязная» категория качества воды по индексу сапробности Пантле – Букка в модификации В. Сладечека, соответствует показателю 4. В такой воде полностью отсутствуют живые организмы [19]
2005	Акватория Воронежского водохранилища	Сброс 190,6 тыс. м^3 загрязненных сточных вод в сутки
8.09.2005	Санаторий им. М. Горького	Разлив топлива на площади около 250 м^2 с образованием на поверхности воды пленки из нефтепродуктов в поле зрения порядка 1,0 км [12]
2006	Санаторий им. М. Горького	Обнаружены антигены вирусного гепатита А, цисты лямблий, сальмонеллы и др. Весьма высока степень бактериального загрязнения [20]
2009	Пляжи и места массового отдыха	Чрезвычайно высокий уровень бактериальной загрязненности. Обнаружены непатогенный холерный вибрион, энтеровирусы, ротавирусы, антиген гепатита А и яйца гельминтов. Качество воды по микробиологическим показателям не соответствовала нормативу в 49 % изученных проб. Вода из системы центрального водоснабжения не соответствовала требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода» [11].
2010–2012	Масловский затон	Катастрофический уровень экологической опасности – 5-й класс качества – «предельно грязная вода». Степень экологического кризиса близка к необратимым изменениям [15]
1.05.2013	В районе пересечения ул. Большая Стрелецкая и ул. Набережная, у берега водохранилища	Появление масляного пятна площадью около 3 000 м^2 [12]
Лето 2013	Масловский затон	Наблюдалось катастрофическое развитие цианобактерий [19]

Продолжение таблицы 1
Continuation of the table 1

Год	Участок водохранилища	Выявленное нарушение
Осень 2013	Донные отложения Масловского затона	Образование мощного слоя дерновины из останков мертвых цианобактерий. Появление насыщенного запаха сероводорода. Наличие катастрофических условий экологической опасности [21]
2011–2015	Места отдыха у стадиона Локомотив», парков «Дельфин» и «Алые паруса»	Содержание нитратов более 40 ПДК, сульфатов более 100 ПДК, хлоридов более 300 ПДК. Обнаружены кишечная палочка с превышением норматива до 240 раз и непатогенный для человека холероподобный вибрион. В двух из 104 проб были обнаружены ротавирусы [22, 23]
14.10.2013	Район навесного моста со стороны левого берега	Пятна от нефтепродуктов размером 2 000 м^2 [12]
2014	Масловский затон	Массовое скопление цианобактерий, выявленные уродства створок диатомей из-за повышенного содержания тяжелых металлов в их организме. Образование застойных вод и гниение донных отложений с сопровождающимся загрязнением воздуха [15].
2015	Акватория Воронежского водохранилища	Превышения ПДК нефтепродуктов. Осенний дождевой сток – 330 ПДК, талый сток – 73 ПДК, весенний сток – 57 ПДК [14]
2012–2016	ООО «Левобережные очистные сооружения» и Вогресовский мост	Содержание нефтепродуктов достигает 7,07 г/кг [16]
2017	ООО «Левобережные очистные сооружения»	Фосфаты – 9,2 ПДК, цинк – 9 ПДК, нефтепродукты – 7,2 ПДК, а также медь – 7 ПДК. Загрязнения с очистных сооружений ОАО «Воронежсинтезкаучук»: медь – 15 ПДК, цинк – 8 ПДК и нефтепродукты – 3 ПДК [3]
2017	Отроженские мосты, Окружной, Северный, Чернавский мосты и мост ВОГРЭС	Обнаружена мутагенная активность в донном грунте, водорослях, поверхностных водах, почве, высших растениях и других компонентах среды. Наибольшее накопление выявлено в водорослях и почве. Обнаружена недостаточная очистка сточных вод. Подтверждено, что стоки ливневой канализации не проходят очистку [21]
2017–2018	Поверхностные воды в районе Левобережных очистных сооружений	Содержание NH_4 в 500 м выше сброса ЛОС – 5,8 ПДК, в месте сброса ЛОС – 25,9 ПДК, а в 1000 м ниже сброса ЛОС – 11,6 ПДК. Содержание NO_2 – 12 ПДК; 14,6 ПДК и 13,5 ПДК, а также по NO_3 – 1,8; 3,1 и 2,5 соответственно. Показатели взвешенных веществ в месте сброса ЛОС – 6,4 ПДК и 2,2 ПДК в 1000 м ниже сброса. (ПДК по водам рыбохозяйственного назначения) Органолептические показатели не соответствуют нормативам [24]
2018	Нижний участок водохранилища	Интенсивное развитие цианобактерий и цианотоксинов. Показатели среды по преобладающему виду живых микроорганизмов соответствуют категории эколо-гического регресса [24]
Ежегодно	Вся территория водохранилища, окрестности пос. Рыбачьего и Масловского затона	Замор рыбы [12]

Таблица 2. Проблемы Воронежского водохранилища и пути их решения
Table 2. Problems of Voronezh Reservoir and ways of their solution

Проблема	Решение
Оползни, обвалы	Посадка твердой растительности на склонах водоема и в прибрежных зонах. Уменьшение многоэтажной застройки [25].
Эпидемиологические нарушения	Санитарная обработка мелководных участков [12].
Зарастание жесткой растительностью	Очистка водоема от жесткой растительности [17]
Намывные территории, заболачивание	Регулярная очистка донных отложений [26]
Низкое самоочищение	Углубление ложа водохранилища [15] Углубление мелководных зон [26]
Загрязнение тяжелыми металлами	Улучшение мощностей и качества очистных сооружений. Улучшение и регулировка системы ливневых стоков и канализации. Повышение штрафов за нарушения санитарных норм [13]
Долговременное сохранение благоприятного состояния экосистемы	Проведение мониторинга экосистемы водохранилища [3]

Таблица 3. Предлагаемые пути решения проблемы «цветения» водоема
Table 3. The proposed ways of the water body «blooming» problem solution

Метод	Положительный эффект	Отрицательный эффект
Хлорирование воды	Уничтожение цианобактерий	Гибель всей микрофлоры водоема
Воздействие ультразвуком [27]		Слабый эффект
Альголизация (подселение водоросли Chlorellakessleri) [28]		Препятствует развитию полезных микроорганизмов
Углубление водохранилища [15]	Увеличение скорости течения, самоочищение водоема [15], регулярная механическая очистка [13]	Активирование загрязнений, захороненных в донных отложениях [3]
Регулярная промывка верхнего бьефа гидроузла [12]	Повышение водообмена. Снижение цветения	Высокие финансовые затраты. Сложность проведения работ

са качества воды. Однако в 2014 г. при исследовании поверхностных вод в Масловском затоне с помощью данной методики был получен показатель 1,68, соответствующий незначительной степени загрязнения, достаточной для самоочищения водоема. При этом загрязненность воды была чрезвычайно высокой [15]. В целях разрешения данного несоответствия был применен метод Т. Ватанабе для расчета органического загрязнения [15]. Данная ситуация еще раз свидетельствует о необходимости комплексного подхода к проведению мониторинга окружающей среды.

В научной среде неоднократно возникали разнообразные предложения по улучшению состояния Воронежского водохранилища. Так, в 2017 г. была разработана программа «Экологический менеджмент территории Воронежского водохранилища», целью которой является очищение водоема и поддержание его экосистемы в благоприятном состоянии. Программа включает проведение различных работ, мониторинг состояния окружающей среды, отбор проб и обработку полученных данных, а также решение многих других важных задач. Реализация данной программы поможет улучшить качество питьевой воды в Воронеже и экологическое состояние водохранилища [3]. Однако для этого необходимо изменение статуса Воронежского гидроузла [12].

Для решения каждой из поставленных задач были предложены различные методики. Их комплексное применение позволит нейтрализовать негативные последствия отдельных видов работ и приумножить их положительный эффект. Предполагаемые пути решения проблем Воронежского водохранилища представлены в табл. 2.

Отдельно методы решения проблемы «цветения» Воронежского водохранилища представлены в табл. 3, кроме положительного эффекта, отмечены и отрицательные стороны каждого метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного анализа публикаций можно сделать следующие выводы.

Низкое качество воды в Воронежском водохранилище может быть одной из причин ухудшения здоровья населения. Наличие нефтепродуктов, цианотоксинов и тяжелых металлов в питьевой воде при попадании в организм человека и животного способно привести к серьезным заболеваниям и патологиям.

При отсутствии мер по решению экологических проблем Воронежского водохранилища состояние его экосистемы в периоды максимального антропогенного воздействия и «цветения» поверхностных вод будет близко к экологическому бедствию и последствия загрязнения будут необратимыми.

На данный момент создана программа экологического менеджмента Воронежского водохранилища. В ней предлагаются способы решения всех актуальных проблем водоема и источники финансирования проводимых работ. Также разработана программа мониторинга и система поддержания благополучного состояния экосистемы водоема в течение длительного времени. Осуществление данного проекта обеспечит благоприятное состояние экосистемы Воронежского водохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность Воронежского водохранилища // Материалы III региональной научно-практической конференции / Воронежский государственный университет. Воронеж. 2005. 92 с. EDN VTAFOZ.
2. Приоритетные направления экологической реабилитации Воронежского водохранилища // Материалы Всероссийской научно-практической конференции / Департамент природных ресурсов и экологии Воронежской области и др. Воронеж: Изд-во Научная книга, 2012. 416 с. – ISBN 978-5-98222-805-5. EDN PNBEFD.
3. Сейдалиев Г.С., Косинова И.И., Соколова Т.В., Силкин К.Ю. Экологический менеджмент территории Воронежского водохранилища. Воронеж: Истоки, 2017. 186 с.
4. Курдов А.Г., Дмитриева В.А. Воронежское водохранилище 30 лет спустя // Вестник ВГУ. 2002. № 1. С. 124–128. EDN SMCLHJ.
5. Бочаров В.Л., Бугреева М.Н., Строгонова Л.Н., Шкляр М.И. Сравнительная гидрогеохимическая характеристика поверхностных и подземных вод Воронежского водохранилища // Вестник ВГУ. 2004. №1. С. 157–163.
6. Михеев Ю.Ю., Моисеева Е.В. Эколого-аналитический анализ качества воды рекреационных зон Воронежского водохранилища // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7. № 3 (46). С. 187–193.
7. Сидельникова Е.А. Жесткая растительность как фактор заиления дна Воронежского водохранилища // Дипломная работа по направлению «Геология». М., 2012. 103 с.
8. Бокарев Д.В. Экологические проблемы загрязнения урбоэкосистем нефтепродуктами (на примере г. Воронежа) // Вестник ВГУ. 2000. №10. С. 217–219.
9. Поляк Ю.М., Поляк М.С. Роль цианотоксинов в патологии человека и животных // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. Санкт-Петербург. 2022. № 2. С. 231–243.
10. Румянцев В.А., Григорьева Н.Ю., Чистякова Л.В. Исследование изменений физиологического состояния цианобактерий после слабого ультразвукового воздействия // Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН. Доклады академии наук. Санкт-Петербург. 2017. Т. 475. № 5. С.580–583.
11. Бережнова Т.А., Мамчик Н.П. Оценка состояния водных объектов в местах водопользования населения г. Воронежа // Фундаментальные исследования. 2010. № 9. С. 115–120.
12. Разиньков Н.Д., Титова С.Л. Экологические проблемы Воронежского водохранилища и возможность расширения спектра методов их преодоления // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2014. № 1 (5). С. 15–18.
13. Прожорина Т.И., Нагих Т.В. Оценка влияния стоков левобережных городских очистных сооружений на качество вод Воронежского водохранилища // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2018. № 3 (6). С. 65–70.
14. Прожорина Т.И., Якунина Н.И., Нагих Т.В. Исследование влияния поверхностного стока с селитебных территорий на загрязнение Воронежского водохранилища // Вестник ВГУ. 2018. № 2. С. 115–120.
15. Анциферова Г.А., Беспалова Е.В. Состояние водной среды Воронежского водохранилища в связи с экологической ситуацией в Масловском затоне // Вестник ВГУ. Воронеж. 2016. № 2. С. 91–100.
16. Чувычкин А.Л., Яблонских А.Л., Девятова Т.А. Качество поверхностных вод Воронежского водохранилища и его влияние на здоровье населения г. Воронежа // Вестник ВГУ. 2018. № 2. С. 270–277. – EDN XUWIST.
17. Залата А.Е., Силкин К.Ю. Дистанционный мониторинг преобразования Воронежского водохранилища под действием комплекса природно-антропогенных факторов // Материалы научной сессии Воронежского государственного университета. Секция экологической геологии. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2015. С. 17–22.
18. Силкин К.Ю. Методика оценки экологического состояния Воронежского водохранилища по материалам многозонального дистанционного зондирования // Вестник ВГУ. 2012. № 1. С. 220–223.

19. Анциферова Г.А., Кульнев В.В., Шевырев С.Л., Беспалова Е.В. Искусственные водные объекты бассейна реки Воронеж // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 8. С. 50–54.
20. Смирнова А.Я., Кислякова Е.Н. Геоэкологические проблемы Воронежского водохранилища // Вестник ВГУ. 2008. № 2. С. 198– 201.
21. Иванова Е.Ю. Аккумуляция генотоксических соединений некоторыми компонентами водных и прибрежных экосистем Воронежского водохранилища // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44. № 1. С. 113–120.
22. Беспалова Е.В. Геоэкологический мониторинг Воронежского водохранилища и прилегающей территории // Вода: химия и экология. 2017. № 9 (111). С. 28–36.
23. Клепиков О.В., Хицова Л.Н., Молоканова Л.В. Оценка экологического состояния Воронежского водохранилища по санитарно-гигиеническим и микробиологическим показателям // Вестник ВГУ. № 1. 2017. С. 87–91.
24. Повалюхина, Т.В., Корольков, Г.В., Попов В.И. О некоторых методах снижения уровня желудочно-кишечных заболеваний населения города Воронежа // Материалы молодежного инновационного проекта «Школа экологических перспектив». Воронеж. 2012. С. 192–198. EDN ASQPNJ.
25. Косинова И.И., Соколова Т.В. Методологические особенности оценки экологического состояния донных отложений искусственно созданных водных объектов // Вестник ВГУ. 2015. № 3. С.113–121.
26. Мишон В.М. Прогноз заиления и занесения Воронежского водохранилища продуктами разрушения берегов, фитопланктона и высшей водной растительности // Вестник ВГУ. 2010. №1. С. 92–97.
27. Брычаева И.Н., Лухтанов В.Т., Кульнев В.В. Биологическая реабилитация водных объектов и сточных вод методом коррекции альгоценоза // Журнал в журнале. Коммунальный комплекс России. 2019. № 8 (182). С. 24–29.
28. Бутакова Е.А., Павлюк Т.Е., Ушакова О.С., Попов А.Н. К вопросу об альголизации водоемов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. Екатеринбург. 2013. С. 75–84.
29. Сейдалиев Г.С., Косинова И.И., Соколова Т.В. Донные отложения как индикатор экологического стояния Воронежского водохранилища // Материалы третьей Международной научно-практической конференции / Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы. Воронеж: Цифровая полиграфия. 2013. С. 201–207. EDN UMIPHR.

REFERENCES

1. Safety of the Voronezh reservoir. Materialy III regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsiyi. *Proceedings of the III regional scientific and practical conference*. Voronezh State University. Voronezh. 2005. 92 p. (In Russ.). EDN VTAFOZ.
2. Priority directions of ecological rehabilitation of the Voronezh reservoir Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsiyi. *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference.* Department of Natural Resources and Ecology of the Voronezh region, etc. Scientific Book Publishing House, LLC. Voronezh. 2012. 416 p. (In Russ.). EDN PNBEFD.
3. Seydaliev G.S., Kosinova I.I., Sokolova T.V., Silkin K.Y. Environmental management of the territory of the Voronezh reservoir. Publishing house Istoki. Voronezh. 2017. 186 p. (In Russ.).
4. Kurdov A.G. Dmitrieva V.A. Voronezh reservoir 30 years later. *Bulletin of the VSU.* 2002. No. 1. P. 124–128. (In Russ.). EDN SMCLHJ.
5. Bocharov V.L., Bugreeva M.N., Strogonova L.N., Shklyar M.I. Comparative hydrogeochemical characteristics of surface and underground waters of the Voronezh reservoir. *Bulletin of the VSU.* 2004. No. 1. P. 157–163 (In Russ.).
6. Mikheev Y.Y., Moiseeva E.V. Ecological and analytical analysis of water quality in recreational areas of the Voronezh reservoir. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice.* 2019. Vol. 7. No. 3 (46). P. 187–193 (In Russ.).
7. Sidelnikova E.A. Hard vegetation as a factor of siltation of the bottom of the Voronezh reservoir. *Diploma in geology.* M., 2012. 103 p. (In Russ.).

8. Bokarev D.V. Ecological problems of pollution of urban ecosystems with petroleum products (on the example of Voronezh). *Bulletin of the VSU.* 2000. No. 10. P. 217–219. (In Russ.).
9. Polyak Yu.M., Polyak M.S. The role of cyanotoxins in human and animal pathology. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology.* Saint Petersburg. 2022. No. 2. P. 231–243. (In Russ.).
10. Rumyantsev V.A., Grigorieva N.Y., Chistyakova L.V. Study of changes in the physiological state of cyanobacteria after weak ultrasonic exposure. Sankt–Peterburgskiy federalniy nauchno-issledovatelskiy tsentr RAN. *St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Reports of the Academy of Sciences.* St. Petersburg. 2017. Vol. 475. No. 5. P. 580–583. (In Russ.).
11. Berezhnova T.A., Mamchik N.P. Assessment of the state of water bodies in places of water use of the Voronezh population. *Fundamental research.* 2010. No. 9. P. 115–120 (In Russ.).
12. Razinkov N.D., Titova S.L. Environmental problems of the Voronezh reservoir and the possibility of expanding the range of methods for overcoming them. *Modern technologies for ensuring civil defense and eliminating the consequences of emergencies.* 2014. No. 1 (5). P. 15–18 (In Russ.).
13. Prozhorina T. I., Nagikh T. V. Assessment of the impact of wastewater from left-bank urban wastewater treatment plants on the water quality of the Voronezh reservoir. *Housing and communal infrastructure.* 2018. No. 3 (6). P. 65–70. (In Russ.).
14. Prozhorina T.I., Yakunina N.I., Nagikh T.V. Study of the influence of surface runoff from residential areas on the pollution of the Voronezh reservoir. *Bulletin of the VSU.* 2018. No. 2. P. 115–120. (In Russ.).
15. Antsiferova, G. A. Bespalova E. V. The state of the aquatic environment of the Voronezh reservoir in connection with the ecological situation in the Maslovsky zaton. *Bulletin of the VSU.* Voronezh. 2016. No. 2. P. 91–100 (In Russ.).
16. Chuvychkin, A.L., Yablonskikh A.L., Devyatova T.A. The quality of surface waters of the Voronezh reservoir and its impact on the health of the population of Voronezh. *Bulletin of the VSU.* 2018. No. 2. P. 270–277 (In Russ.). EDN XUWIST.
17. Zalata A.E., Silkin K.Y. Remote monitoring of the transformation of the Voronezh reservoir under the influence of a complex of natural and anthropogenic factors. *Proceedings of the Scientific session of the Voronezh State University. Section of ecological geology.* Voronezh State University. Voronezh. 2015. P. 17–22 (In Russ.).
18. Silkin K.Y. Methodology for assessing the ecological state of the Voronezh reservoir based on multispectral remote sensing materials. *Bulletin of the VSU.* Voronezh. 2012. No 1. P. 220–223 (In Russ.).
19. Antsiferova G.A., Kulnev V.V., Shevyrev S.L., Bespalova E.V. Artificial water bodies of the Voronezh River basin. *Ecology and industry of Russia.* 2018. Vol. 22. No. 8. P. 50–54. (In Russ.).
20. Smirnova A.Ya., Kislyakova E.N. Geoecological problems of the Voronezh reservoir. *Bulletin of the VSU. Voronezh.* 2008. No. 2. P. 198–201 (In Russ.).
21. Ivanova E.Y. Accumulation of genotoxic compounds by some components of aquatic and coastal ecosystems of the Voronezh Reservoir. *Regional geosystems.* 2020. Vol. 44. No. 1. 113–120. (In Russ.).
22. Bespalova E.V. Geoecological monitoring of the Voronezh reservoir and the surrounding area. *Water: chemistry and ecology.* 2017. No. 9 (111). P. 28–36 (In Russ.).
23. Klepikov O.V., Khitsova L.N., Molokanova L.V. Assessment of the ecological state of the Voronezh reservoir according to sanitary, hygienic and microbiological indicators. *Bulletin of the VSU.* No. 1. Voronezh. 2017. P. 87–91 (In Russ.).
24. Povalyukhina, T.V., Korolkov, G. V., Popov V. I. On some methods of reducing the level of gastrointestinal diseases of the Voronezh city population. *Proceedings of the youth innovation project "School of environmental perspectives".* Voronezh. 2012. P. 192–198 (In Russ.). EDN ASQPNJ.
25. Kosinova I. I., Sokolova T. V. Methodological features of assessing the ecological state of bottom sediments of artificially created water bodies. *Bulletin of the VSU.* 2015. No. 3. P. 113–121.
26. Mishon V.M. Forecast of siltation and deposition of the Voronezh reservoir by products of destruction of the shores, phytoplankton and higher aquatic vegetation. *Bulletin of the VSU.* 2010. No. 1. P. 92–97 (In Russ.).

27. Brychaeva I.N., Lukhtanov V.T., Kulnev V.V. Biological rehabilitation of water bodies and wastewater by algocenosis correction method. *Journal in the journal. Municipal complex of Russia*. Voronezh. 2019. No. 8 (182). P. 24–29 (In Russ.).
28. Butakova E.A. Pavlyuk T.E., Ushakova O.S., Popov A.N. On the issue of algolization of reservoirs. Yekaterinburg, 2013. P. 75–84 (In Russ.).
29. Seidailiev G.S., Kosinova I.I., Sokolova T.V. Bottom sediments as an indicator of the ecological state of the Voronezh reservoir. *Proceedings of the third International scientific and practical conference. Ecological geology: theory, practice and regional problems.* Digital printing. *Voronezh.* 2013. P. 201–207 (In Russ.). EDN UMIPHR.

Сведения об авторах:

Елисеев Александр Алексеевич, студент второго курса магистратуры кафедры экологической геологии геологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Россия; e-mail: eliseev.36@yandex.ru

Силкин Константин Юрьевич, доцент кафедры экологической геологии геологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Россия; e-mail: const.silkin@yandex.ru

About the authors:

Alexandr A. Eliseev, Student, Department of Ecological Geology of Geological Faculty, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: eliseev.36@yandex.ru

Konstantin Y. Silkin, Associate Professor, Department of Ecological Geology of Geological Faculty, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: const.silkin@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 27.12.2023.
Поступила после рецензирования / Revised 21.03.2024.
Принята к публикации / Accepted 27.01.2025.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Manuscripts are reviewed and edited in RosNIIVKh editorial office.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакторы: Т.М. Принцева, Н.А. Валек, В.А. Федотов
Перевод А.Б. Кочев
Подписано в печать 26.03.2025. Дата выхода в свет 04.04.2025.
Формат 70x100 $^{1}/_{16}$. Усл. печ. л. 8,25. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «ДжиЛайм»,
юридический адрес: 620078, г. Екатеринбург, ул Мира 37-25.
Тел.: +7(343)362-42-28, www.glime.ru, e-mail: g_lime@mail.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

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

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

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

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

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

Выходит с 1999 года 6 раз в год.

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ И РЕДАКЦИИ: 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 and Editoral Board: 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

