

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 4, 2026

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2026

Главный редактор

А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; Н. А. БЕЛКИНА, д. г. н.; И. Н. БОЛОТОВ, член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; Х. ГАО, доктор математики, проф. (КНР); Н. В. ИЛЬМАСТ, д. б. н.; Ю. В. ЗАЙКА, д. ф.-м. н.; С. В. КРИВОВИЧЕВ, академик РАН, д. ф.-м. н.; А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Ю. Н. ЛУКИНА, д. б. н.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, академик РАН, д. б. н., проф.; А. Н. РЕТТИЕВА, д. ф.-м. н.; С. А. СВЕТОВ, д. г.-м. н.; А. И. СЛАБУНОВ, д. г.-м. н.; Н. Ю. СУХОВИЛО, к. г. н. (Республика Беларусь); С. ЛИ, доктор геологии (КНР); Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Н. С. ЧЕРНЕЦОВ, д. б. н., член-корр. РАН; В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия серии «Лимнология и океанология»

Н. Л. БОЛОТОВА, д. б. н., проф.; Н. Е. ГАЛАХИНА (зам. ответственного редактора), к. х. н.; С. Д. ГОЛОСОВ, к. ф.-м. н.; А. В. ЗИМИН, д. г. н.; Д. В. ИВАНОВ, д. г. н.; Н. В. ИЛЬМАСТ, д. б. н.; А. В. ИСАЕВ, к. г. н.; С. Ф. КОМУЛАЙНЕН, д. б. н.; С. А. КОНДРАТЬЕВ, д. ф.-м. н.; А. В. КУРАЕВ, к. г. н.; Е. А. КУРАШОВ, д. б. н., проф.; И. Ш. НОРМАТОВ, д. х. н., проф.; Л. А. ПЕСТРЯКОВА, д. г. н., к. б. н.; Т. И. РЕГЕРАНД (ответственный секретарь), к. б. н.; А. И. СИДОРОВА, к. б. н.; А. П. ФЕДОТОВ, д. г.-м. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ (ответственный редактор), чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.; Г. Т. ФРУМИН, д. х. н., проф.

Издается с января 2009 г.

Адрес редакции: 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
Тел. (8142)762018; факс (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

**of the KARELIAN RESEARCH CENTRE
of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES**

No. 4, 2026

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY

Petrozavodsk
2026

Editor-in-Chief

A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); N. A. BELKINA, DSc (Geog.); I. N. BOLOTOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); N. S. CHERNETSOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; H. GAO, PhD (Phys.-Math.), Prof. (China); N. V. ILMAST, DSc (Biol.); Yu. V. ZAIKA, DSc (Phys.-Math.); S. V. KRIVOVICHEV, RAS Academician, DSc (Phys.-Math.); A. M. KRYSHEN, DSc (Biol.); O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); Yu. N. LUKINA, DSc (Biol.); V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; A. N. RETTIEVA, DSc (Phys.-Math.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SVETOV, DSc (Geol.-Miner.); A. I. SLABUNOV, DSc (Geol.-Miner.); N. Yu. SUKHOVILO, PhD (Geog.) (Republic of Belarus); X. LI, PhD (Geol.-Miner.) (China); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the Experimental «Limnology and Oceanology» Series

N. L. BOLOTOVA, DSc (Biol.), Prof.; A. P. FEDOTOV, DSc (Geol.-Miner.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.), Prof.; N. E. GALAKHINA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Chem.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); N. V. ILMAST, DSc (Biol.); A. V. ISAEV, PhD (Geog.); D. V. IVANOV, DSc (Geog.); S. F. KOMULAINEN, DSc (Biol.); S. A. KONDRATYEV, DSc (Phys.-Math.); A. V. KURAEV, PhD (Geog.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.), Prof.; I. Sh. NORMATOV, DSc (Chem.), Prof.; L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.), PhD (Biol.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. I. SIDOROVA, PhD (Biol.); A. V. ZIMIN, DSc (Geog.).

Published since January 2009

Monthly

Editorial Office address: 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Tel. (8142)762018; fax (8142)769600

E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Full-text electronic version: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

УДК 551.465.62

ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРОВ MODIS/AQUA И MODIS/TERRA

А. А. Коник^{1,2*}, А. В. Исаев¹, А. В. Зимин¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997), *konikrshu@gmail.com

² Московский физико-технический институт (Институтский пер., 9, Долгопрудный, Россия, 141701)

В настоящем исследовании выполнена оценка точности восстановления температуры поверхности Ладожского озера по данным радиометров MODIS, установленных на спутниках Aqua и Terra, в теплый период (май–октябрь) 2003–2013 гг. Для валидации привлекались 245 контактных измерений в поверхностном слое, полученных сотрудниками Института озероведения РАН, и 62 мгновенных спутниковых поля температуры поверхности обработки L2, полученных с использованием алгоритма NASA, с пространственным разрешением 1 км. Сопоставление спутниковых и *in situ* данных показало выраженную линейную зависимость с высокими коэффициентами детерминации ($R^2 > 0,9$), что подтверждает надежность MODIS для оценки пространственно-временной изменчивости поверхностной температуры воды. Вместе с тем выявлено систематическое положительное смещение спутниковых значений относительно судовых измерений, достигающее 0,5 °С. Детальный анализ ошибок показал, что данные MODIS/Aqua в среднем точнее данных MODIS/Terra (средняя абсолютная ошибка 0,73 °С против 0,85 °С). Однако для ошибки данных MODIS/Aqua характерна выраженная сезонная изменчивость: в мае–июне наблюдается значительное положительное смещение при низком разбросе, тогда как в июле–октябре систематическая ошибка снижается, но возрастает дисперсия. Ошибка данных MODIS/Terra демонстрирует временную стабильность на протяжении всего рассматриваемого периода (май–октябрь). Полученные результаты подтверждают принципиальную применимость обоих радиометров для мониторинга состояния Ладожского озера, однако различия в величине и сезонной динамике ошибок указывают на необходимость учета специфики каждого прибора при анализе сезонной изменчивости температуры поверхности воды и формировании рядов для оценки климатических характеристик.

Ключевые слова: температура поверхности воды; MODIS; *in situ*; валидация; Ладожское озеро

Для цитирования: Коник А. А., Исаев А. В., Зимин А. В. Оценки точности температуры поверхности воды Ладожского озера по данным радиометров MODIS/Aqua И MODIS/Terra // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 5–13. doi: 10.17076/lim2216

Финансирование. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект № 23-17-20010) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010).

A. A. Konik^{1,2*}, A. V. Isaev¹, A. V. Zimin¹. ESTIMATION OF THE ACCURACY OF THE MODIS/AQUA AND MODIS/TERRA SATELLITE TEMPERATURES FOR LAKE LADOGA DURING THE WARM SEASON

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (3 Nakhimovskiy Ave., Moscow, Russia, 117997), *konikrshu@gmail.com

² Moscow Institute of Physics and Technology (9 Institutskij lane, 141701 Dolgoprudny, Russia)

This study assesses the accuracy of lake surface temperature (LST) retrievals for Lake Ladoga based on MODIS radiometers aboard the Aqua and Terra satellites during the warm season (May–October) from 2003 to 2013. The validation employed 245 *in situ* surface layer measurements collected by the Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, together with 62 instantaneous satellite L2 fields generated using the NASA algorithm with a spatial resolution of 1 km. A comparison between satellite and *in situ* observations revealed a pronounced linear relationship with high coefficients of determination ($R^2 > 0.9$), confirming the reliability of MODIS products for evaluating the spatio-temporal variability of lake surface temperature. At the same time, a systematic positive bias of satellite-derived values relative to ship-based measurements was identified, reaching up to 0.5 °C. A detailed error analysis demonstrated that MODIS/Aqua generally outperformed MODIS/Terra in terms of mean absolute error (0.73 °C vs. 0.85 °C), although it was characterized by pronounced seasonal variability: in May–June, Aqua exhibited substantial positive bias with low error dispersion, whereas in July–October the systematic bias decreased while variance increased markedly. By contrast, MODIS/Terra showed temporal stability, maintaining consistent bias and standard deviation values throughout the entire observation period, making its records more predictable and reliable for constructing long-term climate series. These findings confirm the fundamental applicability of both radiometers for monitoring the thermal state of Lake Ladoga, while highlighting the need to account for instrument-specific error characteristics when analyzing seasonal thermal dynamics and developing climate-quality datasets.

Keywords: satellite lake surface temperature; MODIS; *in situ*; validation; Lake Ladoga

For citation: Konik A. A., Isaev A. V., Zimin A. V. Estimation of the accuracy of the MODIS/Aqua and MODIS/Terra satellite temperatures for Lake Ladoga during the warm season. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 5–13. doi: 10.17076/lim2216

Funding. The research was supported by grants from the Russian Science Foundation (project No. 23-17-20010) and the St. Petersburg Science Foundation (project No. 23-17-20010).

Введение

В последние десятилетия накопленные архивы спутниковых наблюдений температуры поверхности Мирового океана и крупных озер позволяют исследовать изменчивость термического режима на временных масштабах от суточных до климатических. Вместе с тем большинство исследований, посвященных температурному режиму поверхностных вод крупных и замкнутых пресноводных водоемов, основаны преимущественно на данных *in situ* [Melnik et al., 2006; Boehrer et al., 2009; Современное..., 2021; Carmack, Vagle, 2021; Науменко, Гузиватый, 2022а, б, 2024; Carmack et al., 2024]. Это обусловлено рядом ограничений спутниковых методов: отсутствием эффективной атмосферной коррекции и специализированных региональных алгоритмов для конкретных водоемов. В документации, описывающей алгоритм получения температуры поверхности воды по

данным радиометров MODIS со спутников Aqua и Terra, указывается, что погрешность измерений температуры на озерах может достигать 1 °C (<https://seabass.gsfc.nasa.gov>, дата обращения: 10.09.2025).

В последние годы все большее внимание уделяется вопросам оценки качества восстановления температуры поверхности воды по данным спутниковых радиометров для крупных озер. Это открывает возможность получения одномоментной информации о температуре озера на всей его акватории, а при создании длительных рядов сведений – о термическом режиме акватории озера. Так, на основе данных радиометров AVHRR и MODIS и многолетних наблюдений с буйковых станций продемонстрирована применимость спутниковых измерений для оценки температурного режима Женевского и Боденского озер [Oesch et al., 2005]. При этом основным источником ошибок при восстановлении поверхностной температуры озер остается

облачность. Для Большого Соленого озера был разработан метод получения ежедневных валидированных карт температуры поверхности с повышенным пространственным разрешением, что позволило уменьшить среднеквадратичную ошибку на 60 % по сравнению со стандартным оперативным анализом [Grim et al., 2013]. В работе [Moukomla, Blanken, 2016] на примере акватории Великих Американских озер показано, что объединение спектральных каналов радиометра MODIS обеспечивает восстановление температурных полей при любых условиях облачности. Сравнение с данными *in situ* выявило высокую корреляцию (0,91) и небольшое стандартное отклонение (1,39 °C). Накопленный опыт исследований показывает, что валидация данными *in situ* является обязательным условием при использовании спутниковых измерений для достоверной оценки сезонной и межгодовой динамики температуры поверхности крупных озер. В этом контексте особый интерес представляет Ладожское озеро, крупнейший пресноводный водоем Европы, имеющий важное хозяйственное и экономическое значение. Температурный режим Ладожского озера является одним из основных факторов, оказывающих прямое влияние на функционирование его экосистемы [Malm et al., 1994; Гузиватый и др., 2020; Современное..., 2021]. Многолетние наблюдения *in situ* [Современное..., 2021] позволили установить общий внутригодовой ход температуры, выявить особенности динамики таких явлений, как термобар [Блохина, 2015], а также оценить их влияние на экосистему озера [Современное..., 2021]. Показано, что температурные поля отражают особенности динамики и переноса вод, включая апвеллинги, фронтальные зоны и вихревые структуры. При этом существенное влияние на термический режим оказывают атмосферные процессы, как непосредственно над акваторией озера, так и над его водосбором [Науменко, 2021]. Анализ спутниковых данных для оценки температуры озера выполнялся в ряде исследований. Например, в работе [Коросов и др., 2006] с использованием спутниковых данных SeaWiFS и AVHRR (1998–2004 гг.) восстановлены и проанализированы поля температуры поверхности воды, концентраций хлорофилла, минеральной взвеси и растворенного органического вещества в водах Ладожского озера. В работе [Тронин, 2016] выполнен детальный анализ многолетних спутниковых данных температуры поверхности за 1991–2015 гг., где был выявлен положительный тренд роста поверхностной температуры для всей акватории озера.

Имеющиеся работы по сопоставлению данных контактных и дистанционных наблюдений

температуры Ладожского озера выполнялись только для данных со спутников серии NOAA [Тихомиров, 1982, 1987]. Спутниковые данные продемонстрировали систематическое завышение температуры поверхности воды в мае–июне и занижение в середине июля по сравнению с измерениями *in situ*. Первый период соответствует фазе интенсивного прогрева водоема, второй – фазе умеренного прогрева и начала охлаждения. Наибольшие расхождения между контактными и дистанционными измерениями наблюдались в термоактивной зоне вблизи термобара [Тихомиров и др., 1987].

В настоящее время для изучения температуры поверхности воды Ладожского озера активно используются данные MODIS, в частности, для анализа положения термобара [Zimin et al., 2023]. Однако достоверность таких исследований остается под вопросом, поскольку специализированная валидация этих спутниковых данных до сих пор не проводилась.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка качества воспроизведения температуры поверхности Ладожского озера по спутниковым данным радиометров MODIS в теплый период 2003–2013 гг.

Материалы и методы

Сопоставление спутниковых и контактных измерений температуры поверхности озера проводилось для теплого периода (май–октябрь), что объясняется особенностями выполнения наблюдений. Для анализа использовались 245 *in situ* измерений в поверхностном слое, полученных сотрудниками Института озераведения РАН [Современное..., 2021] за май–октябрь 2003–2013 гг. Расположение точек *in situ* измерений, выполнявшихся на гидрологических станциях на акватории озера, представлено на рис. 1.

В качестве исходных спутниковых данных для проведения их валидации натурными наблюдениями привлекались 62 мгновенных поля радиометров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)/Aqua и MODIS/Terra уровня обработки L2. Использовались данные стандартного алгоритма обработки, представленного в открытом доступе на сайте <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 10.09.2025). Пространственное разрешение данных составляло 1 км. Анализ спутниковых полей температуры выполнялся только для данных с маркерами качества (параметр *SST_qual*) стандартного алгоритма обработки 0 (отличное) и 1 (хорошее). Итоговая обеспеченность данными для валидации представлена в табл. 1.

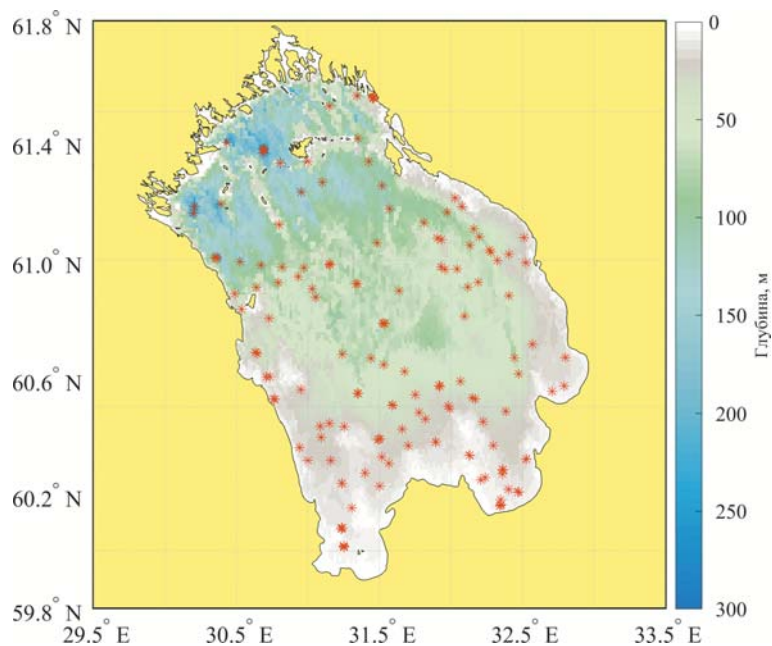


Рис. 1. Расположение гидрологических станций (красные звезды) за период с 2003 по 2013 год

Fig. 1. Location of hydrological stations (red stars) for the period from 2003 to 2013

Таблица 1. Количество значений *in situ* и полей спутниковых измерений температуры, используемых для валидации
Table 1. The total number of temperature values/fields after filtering to validate satellite measurements

Год Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<i>In situ</i>	21	17	40	13	30	18	27	31	16	20	12
Satellite	6	5	11	4	4	4	9	7	3	4	5

Таким образом, сопоставлялись спутниковые и *in situ* измерения, выполненные в те же даты и в совпадающих координатах. В итоге были сформированы ряды *in situ* наблюдений и дистанционных измерений для инструментов MODIS/Aqua и MODIS/Terra.

Оценка ошибок спутниковых измерений по сравнению с данными *in situ* проводилась как для всего временного диапазона в целом (май–октябрь), так и отдельно для двух временных интервалов. Первый соответствовал данным для мая–июня с длиной ряда (N) 69 значений для MODIS/Aqua и 68 значений для MODIS/Terra, второй – для периода с июля по октябрь с длиной ряда 176 значений для MODIS/Aqua и 164 значения для MODIS/Terra. Выбор двух дополнительных интервалов времени связан с тем, что в мае–июне в Ладожском озере наблюдается термобар, который приводит к формированию высокоградиентных зон в полях температуры, а также к разделению акватории озера на теплоактивную и термоинертную зоны.

В то время как второй выбранный временной интервал (июль–октябрь), напротив, характеризуется умеренным прогревом и охлаждением, что соответствует равномерному распределению температуры по всей акватории озера. Ряды сравнивались между собой на основе нескольких статистических параметров: средней ошибки (m_x), средней абсолютной ошибки (MAE: Mean Absolute Error), средней квадратичной ошибки (MSE: Mean Squared Error) и стандартного отклонения (σ).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 приведены диаграммы рассеяния (с уравнениями регрессии) и функции плотности вероятности распределения ошибок для трех временных диапазонов, построенные по данным контактных и дистанционных измерений. Основные статистические показатели ошибок определения температуры приборами MODIS/Aqua и MODIS/Terra представлены в табл. 2.

Анализ рисунков демонстрирует выраженную линейную зависимость между контактными и спутниковыми данными, что проявляется в характерном вытягивании облака точек вдоль прямой линии для обоих спутников. Эта визуальная закономерность получает статистическое подтверждение через высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 > 0,9$), которые сохраняются как для общего временного диапазона, так и для выделенных сезонных поддиапазонов. Высокая теснота корреляционной связи свидетельствует о принципиальной пригодности спутниковых данных для воспроизведения пространственно-временной изменчивости температуры поверхности воды в Ладожском озере на уровне, сопоставимом с результатами *in situ* измерений.

Более детальная оценка точности, основанная на статистических характеристиках ошибок из табл. 2, показывает удовлетворительное качество спутниковых данных. Однако выявляются и статистически значимые различия между радиометрами на разных спутниках. В целом за весь теплый период данные MODIS/Terra демонстрируют несколько более высокую точность, о чем свидетельствует меньшая средняя абсолютная ошибка (MAE = 0,73 °C) по сравнению с MODIS/Aqua (MAE = 0,85 °C).

Анализ сезонной динамики ошибок выявил различие в поведении радиометров на разных спутниках. Для MODIS/Aqua (рис. 2) характерна резкая сезонная изменчивость. В весенний период (май–июнь) его радиометр работает

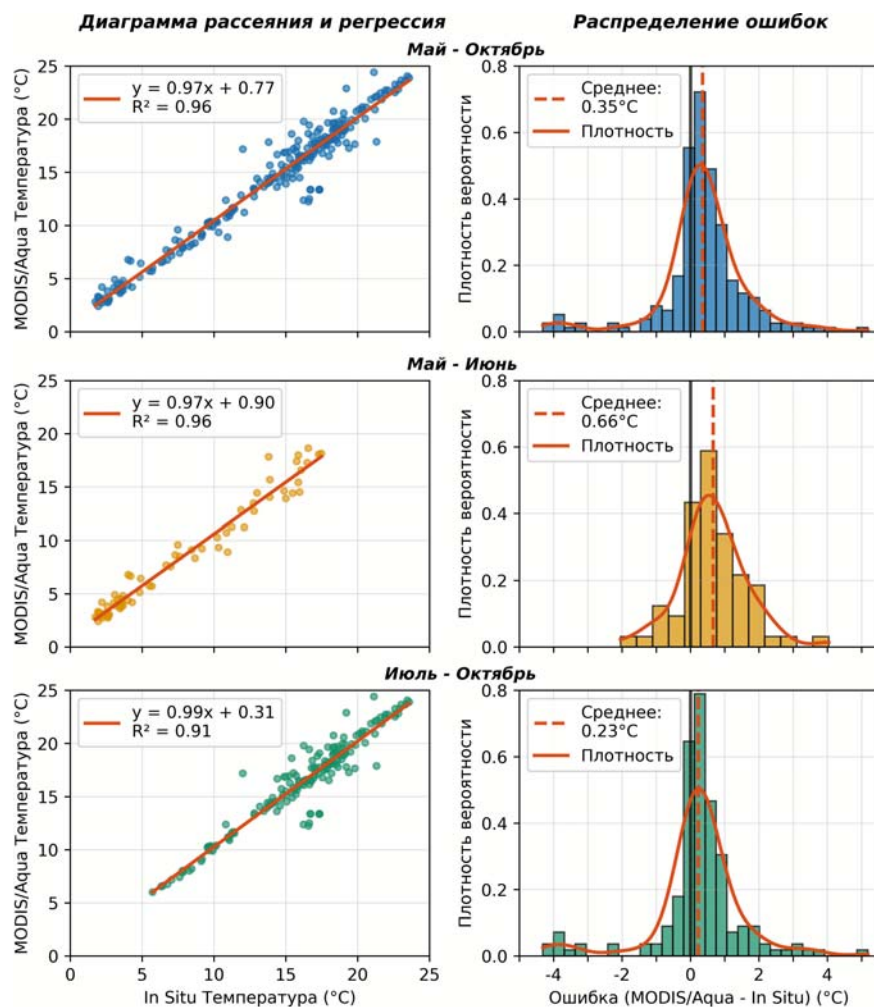


Рис. 2. Результаты расчета линейной регрессии *in situ* и спутниковых измерений температуры для MODIS/Aqua.

Здесь и на рис. 3: $y = ax + b$ – регрессионное уравнение, где a – коэффициент регрессии, b – коэффициент тренда; R^2 – коэффициент детерминации

Fig. 2. The results of calculating linear regression *in situ* and satellite temperature measurements for MODIS/Aqua.

Here and in Fig. 3: $y = ax + b$ is the regression equation, where a is the regression coefficient and b is the trend coefficient; R^2 is the coefficient of determination

со значительным положительным смещением ($m_x = 0,66 \text{ }^\circ\text{C}$), но при этом демонстрирует относительно низкий разброс ошибок ($\sigma = 0,98 \text{ }^\circ\text{C}$). Летом и осенью (июль–октябрь) картина кардинально меняется: систематическое смещение сокращается до минимального значения $0,23 \text{ }^\circ\text{C}$, но радикально, почти на 35 %, возрастает разброс ($\sigma = 1,32 \text{ }^\circ\text{C}$). Данная особенность позволяет предположить, что в теплый сезон на точность показаний прибора со спутника MODIS/Aqua сильнее влияют переменные факторы, такие как повышенная облачность, влажность атмосферы или динамическое состояние водной поверхности, которые вносят случайную, но значительную ошибку, нивелируя выигрыш от уменьшения систематического смещения.

В противоположность этому ошибки MODIS/Terra (рис. 3) показывают временную стабильность. Метрики точности данного радиометра

остаются практически неизменными в течение всего периода наблюдений. Значения m_x колеблются в узком диапазоне от $0,34$ до $0,48 \text{ }^\circ\text{C}$, а величины σ – от $0,77$ до $0,99 \text{ }^\circ\text{C}$. Именно поэтому данные MODIS/Terra обладают неоспоримым преимуществом для климатологов: отличаются высокой устойчивостью к сезонным колебаниям термических условий в акватории озера. Указанная стабильность, выражающаяся в постоянстве ошибок, повышает ценность этого спутникового продукта для построения многолетних климатических рядов.

Распределение плотности вероятности ошибок, представленное на рисунках, предоставляет дополнительное объяснение этим различиям. Положительное смещение для обоих спутников ($0,35 \text{ }^\circ\text{C}$ для MODIS/Aqua (рис. 2) и $0,44 \text{ }^\circ\text{C}$ для MODIS/Terra (рис. 3)) подтверждает выявленную тенденцию к завышению значений.

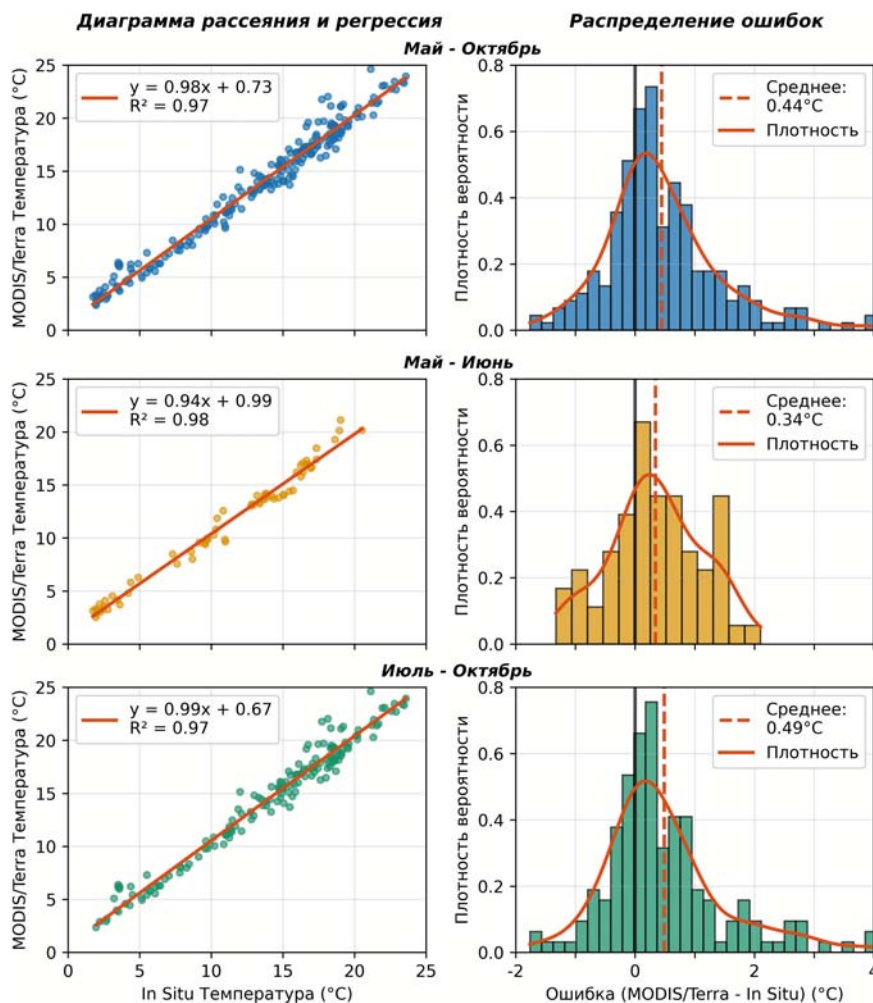


Рис. 3. Результаты расчета линейной регрессии *in situ* и спутниковых измерений температуры для MODIS/Terra

Fig. 3. The results of calculating linear regression *in situ* and satellite temperature measurements for MODIS/Terra

Таблица 2. Статистические характеристики ошибок температуры поверхности воды (попарная разница между рядами температуры MODIS и *in situ*)

Table 2. Statistical characteristics of surface temperature errors for depths up to 30 and over 30 m (pairwise difference between satellite and *in situ* temperature series)

Период/Period	m_x , °C	MAE, °C	MSE, °C ²	σ , °C	N, шт.
Aqua/MODIS (май–октябрь / May–October)	0,35	0,85	1,29	1,24	245
Aqua/MODIS (май–июнь / May–June)	0,66	0,92	1,18	0,98	69
Aqua/MODIS (июль–октябрь / July–October)	0,23	0,82	1,32	0,31	176
Terra/MODIS (май–октябрь / May–October)	0,44	0,73	1,04	0,94	232
Terra/MODIS (май–июнь / May–June)	0,34	0,69	0,84	0,77	68
Terra/MODIS (июль–октябрь / July–October)	0,48	0,76	1,11	0,99	164

Примечание. m_x – средняя ошибка; MAE – средняя абсолютная ошибка; MSE – средняя квадратичная ошибка; σ – стандартное отклонение; N – длина выборки.

Note. m_x – average error; MAE – Mean Absolute Error; MSE – Mean Squared Error; σ – standard deviation; N – sample length.

Однако форма кривых распределения несколько отличается: у MODIS/Aqua (рис. 2) наблюдается более широкий и пологий «хвост» распределения, особенно в летне-осенний период, что подтверждает больший разброс случайных ошибок. В отличие от MODIS/Aqua распределение ошибок MODIS/Terra (рис. 3) является более узким и компактным. Высокая плотность распределения вблизи среднего значения визуально подтверждает его повышенную стабильность, что соответствует меньшей случайной погрешности.

Заключение

В данном исследовании выполнена комплексная валидация спутниковых измерений температуры поверхности Ладожского озера, полученных радиометрами MODIS/Aqua и MODIS/Terra, на основе репрезентативной выборки из 245 *in situ* измерений. Полученные результаты убедительно демонстрируют наличие тесной функциональной зависимости ($R^2 > 0,9$) и исключительно высоких коэффициентов корреляции ($R = 0,97–0,99$) между спутниковыми и натурными данными, что подтверждает принципиальную пригодность продукции MODIS для мониторинга термического режима озера.

Наиболее важным результатом работы стало выявление систематического завышения спутниковых оценок температуры поверхности относительно натуральных наблюдений, составляющего 0,35 °C для MODIS/Aqua и 0,44 °C для MODIS/Terra. При этом проведенный детальный анализ выявил существенные различия в точности получаемых с радиометров данных. Данные MODIS/Terra демонстрируют

статистически значимое превосходство по средней абсолютной ошибке (MAE = 0,73 °C против 0,85 °C у MODIS/Aqua). MODIS/Terra также показал большую стабильность по сравнению с MODIS/Aqua. Изменения его систематического смещения и случайной ошибки между разными интервалами наблюдений (май–июнь и июль–октябрь) были существенно меньше. В противоположность этому ошибки MODIS/Aqua характеризовались значительной изменчивостью по рассматриваемым временным диапазонам. В частности, в период с июля по октябрь, когда систематическая ошибка уменьшалась до 0,23 °C, наблюдался одновременный рост случайной составляющей, стандартное отклонение которой достигало 1,32 °C.

Проведенное исследование демонстрирует важность оценки погрешностей спутниковых измерений температуры поверхности воды как для получения достоверных интегральных оценок пространственно-временной изменчивости термических полей, так и для использования этих данных при верификации математических моделей. Для дальнейшего повышения качества данных дистанционного зондирования необходима разработка региональных алгоритмов, учитывающих специфические оптические и термические особенности Ладожского озера.

Литература

Блохина Н. С., Показеев К. В. Уникальное природное явление – термобар // Земля и Вселенная. 2015. № 6. С. 78–88.

Гузиватый В. В., Науменко М. А., Румянцев В. А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера

методом максимальной кросс-корреляции // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 20–30. doi: 10.31857/S0205961420010042

Коросов А. А., Поздняков Д. В., Филатов Н. Н., Мазуров А. А., Лупян Е. А., Грассл Х., Ионов В. В. Изучение сезонной и пространственной изменчивости некоторых экопараметров в Ладожском озере по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2006. № 5. С. 76–85.

Науменко М. А. Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 2. С. 78–88. doi: 10.7868/S2073667321020076

Науменко М. А., Гузиватый В. В. Климатические соотношения между температурой воздуха и температурами воды различных лимнических районов Ладожского озера // География и природные ресурсы. 2022а. Т. 43, № 1. С. 83–92. doi: 10.15372/GIPR20220109

Науменко М. А., Гузиватый В. В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58, № 1. С. 52–62. doi: 10.31857/S0002351522010102

Науменко М. А., Гузиватый В. В. Связаны ли параметры устойчивой плотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера? // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 328–344. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцева. М.: РАН, 2021. 640 с.

Тихомиров А. И. Дистанционное зондирование температуры поверхности водоемов // Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987. С. 168–173.

Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.

Тихомиров А. И., Каретников С. Г., Вишневский А. Е., Широков К. П. Сравнительная характеристика радиационной температуры и температуры поверхности воды Ладожского озера // Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987. С. 173–183.

Тронин А. А. Температура поверхности морей и озер Северо-Запада России по спутниковым данным // Региональная экология. 2016. № 4(46). С. 52–58.

Boehrer B., Fukuyama R., Chikita K., Kikukawa H. Deep water stratification in deep caldera lakes Ikeda, Towada, Tazawa, Kuttara, Toya and Shikotsu // Limnology. 2009. Vol. 10. P. 17–24. doi: 10.1007/s10201-008-0257-1

Carmack E., Vagle S. Thermobaric processes both drive and constrain seasonal ventilation in deep Great Slave Lake, Canada // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2021. Vol. 126. e2021JF006288. doi: 10.1029/2021JF006288

Carmack E., Vagle S., Kheyrollah Pour H. Seasonal temperature and circulation patterns in a hybrid

Polar Lake, Great Bear Lake, Canada // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2024. Vol. 129. e2024JF007650. doi: 10.1029/2024JF007650

Grim J. A., Kniewel J. C., Crosman E. T. Techniques for using MODIS data to remotely sense lake water surface temperatures // J. Atmos. Ocean. Technol. 2013. Vol. 30. P. 2434–2451. doi: 10.1175/JTECH-D-13-00003

Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jonsson L. Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data // Limnol. Oceanogr. 1994. Vol. 39, no. 6. P. 1333–1348. doi: 10.4319/lo.1994.39.6.1333

Melnik N. G., Bondarenko N. A., Belykh O. I., Blinov V. V., Ivanov V. G., Korovyakova I. V., Kostornova T. Ya., Lazarev M. I., Logacheva N. F., Pomazkova G. I., Sherstyankin P. P., Sorokovikova L. M., Tolstikova L. I., Tereza E. P. Distribution of pelagic invertebrates near a thermal bar in Lake Baikal // Hydrobiologia. 2006. Vol. 568 (Suppl 1). P. 69–76. doi: 10.1007/s10750-006-0331-9

Moukomla S., Blanken P. D. Remote sensing of the North American Laurentian Great Lakes' surface temperature // Remote Sens. 2016. Vol. 8. Art. 286. doi: 10.3390/rs8040286

Oesch D. C., Jaquet J.-M., Hauser A., Wunderle S. Lake surface water temperature retrieval using advanced very high-resolution radiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data: Validation and feasibility study // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. C12014. doi: 10.1029/2004JC002857

Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Blagodatskikh E. A., Konik A. A., Filatov N. N., Rodionov A. A. Submesoscale eddy structures of Lake Ladoga according to Sentinel-1 radar data for a warm period of 2019–2022 // Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 514, no. 2. P. 296–300. doi: 10.1134/s1028334x23602742

References

Blokhina N. S., Pokazeev K. V. A unique natural phenomenon is the thermal bar. *Zemlya i vseleennaya = Earth and Universe*. 2015;6:78–88. (In Russ.)

Boehrer B., Fukuyama R., Chikita K., Kikukawa H. Deep water stratification in deep caldera lakes Ikeda, Towada, Tazawa, Kuttara, Toya and Shikotsu. *Limnology*. 2009;10:17–24. doi: 10.1007/s10201-008-0257-1

Carmack E., Vagle S. Thermobaric processes both drive and constrain seasonal ventilation in deep Great Slave Lake, Canada. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2021;126:e2021JF006288. doi: 10.1029/2021JF006288

Carmack E., Vagle S., Kheyrollah Pour H. Seasonal temperature and circulation patterns in a hybrid Polar Lake, Great Bear Lake, Canada. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2024;129:e2024JF007650. doi: 10.1029/2024JF007650

Grim J. A., Kniewel J. C., Crosman E. T. Techniques for using MODIS data to remotely sense lake water surface temperatures. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2013;30:2434–2451. doi: 10.1175/JTECH-D-13-00003

Guzivatyi V. V., Naumenko M. A., Rummyantsev V. A. Estimation of velocity of upper layer of Lake Ladoga by using of maximum cross correlation (mcc) method. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploration of Earth*

from Space. 2020;2:20–30. (In Russ.). doi: 10.31857/S0205961420010042

Kondrat'ev S. A., Pozdnyakov Sh. R., Rumyantsev V. A. (eds.). Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in the context of changing climate. Moscow: RAN; 2021. 640 p. (In Russ.)

Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Filatov N. N., Mazurov A. A., Lupyay E. A., Grassl Kh., Ionov V. V. A satellite data-based study of seasonal and spatial variations of some ecoparameters in Lake Ladoga. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploration of Earth from Space*. 2006;5:76–85. (In Russ.)

Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jonsson L. Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data. *Limnol. Oceanogr.* 1994;39(6):1333–1348. doi: 10.4319/lo.1994.39.6.1333

Melnik N. G., Bondarenko N. A., Belykh O. I., Blinov V. V., Ivanov V. G., Korovyakova I. V., Kostornova T. Ya., Lazarev M. I., Logacheva N. F., Pomazkova G. I., Sherstyankin P. P., Sorokovikova L. M., Tolstikova L. I., Tereza E. P. Distribution of pelagic invertebrates near a thermal bar in Lake Baikal. *Hydrobiologia*. 2006;568(S1):69–76. doi: 10.1007/s10750-006-0331-9

Moukomla S., Blanken P. D. Remote sensing of the North American Laurentian Great Lakes' surface temperature. *Remote Sens.* 2016;8:286. doi: 10.3390/rs8040286

Naumenko M. A. Features of climatic relationships between surface water-air temperature during vernal heating period in Lake Ladoga. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021;14(2):78–88. (In Russ.). doi: 10.7868/S2073667321020076

Naumenko M. A., Guzivatyi V. V. Climate relationships between air temperature and water temperatures in the different limnetic zones of Lake Ladoga. *Geography and Natural Resources*. 2022;43(1):69–76. doi: 10.1134/S1875372822010097

Naumenko M. A., Guzivatyi V. V. Methodological approaches and results of an analysis of the climatic seasonal course of stable stratification parameters of a dimictic lake (case study of the central part of Lake Ladoga). *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022;58(1):44–53. doi: 10.1134/S0001433822010108

Naumenko M. A., Guzivatyi V. V. Are the parameters of stable density stratification related to the surface temperature of Lake Ladoga? *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2024;75:328–344. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344

Oesch D. C., Jaquet J.-M., Hauser A., Wunderle S. Lake surface water temperature retrieval using advanced very high-resolution radiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data: Validation and feasibility study. *J. Geophys. Res.* 2005;110: C12014. doi: 10.1029/2004JC002857

Tikhomirov A. I. Remote sensing of the surface temperature of reservoirs. *Kompleksnyi distantsionnyi monitoring ozer = Comprehensive remote monitoring of lakes*. Leningrad: Nauka; 1987. P. 168–173. (In Russ.)

Tikhomirov A. I. Thermology of large lakes. Leningrad: Nauka; 1982. 232 p. (In Russ.)

Tikhomirov A. I., Karetnikov S. G., Vishnevsky A. E., Shirokov K. P. Comparative characteristics of radiation temperature and surface temperature of Lake Ladoga water. *Kompleksnyi distantsionnyi monitoring ozer = Comprehensive remote monitoring of lakes*. Leningrad: Nauka; 1987. P. 173–183. (In Russ.)

Tronin A. A. The satellite-measured sea surface temperature change in the North-West Russia ponds. *Regional'naya ekologiya = Regional Ecology*. 2016;4(46):52–58. (In Russ.)

Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Blagodatskikh E. A., Konik A. A., Filatov N. N., Rodionov A. A. Submesoscale eddy structures of Lake Ladoga according to Sentinel-1 radar data for a warm period of 2019–2022. *Doklady Earth Sciences*. 2023;514(2):296–300. doi: 10.1134/S1028334x23602742

Поступила в редакцию / received: 18.09.2025; принята к публикации / accepted: 07.11.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Коник Александр Александрович

канд. геогр. наук, научный сотрудник

e-mail: konikrshu@gmail.com

Исаев Алексей Владимирович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: isaev1975@gmail.com

Зимин Алексей Вадимович

д-р геогр. наук, главный научный сотрудник,
руководитель лаборатории геофизических
пограничных слоев

e-mail: zimin2@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Konik, Aleksander

Cand. Sci. (Geogr.), Researcher

Isaev, Aleksey

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Zimin, Aleksey

Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Head of Laboratory

УДК 502.17

РЕКОГНОСЦИРОВОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ГАЛОГЕНОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ОЗЕРАХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ И МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТЕЙ

Т. А. Королева*, Е. А. Вахрамеева, Р. Д. Коробицына

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н. П. Лаврова Уральского отделения РАН (пр. Никольский, 20,
Архангельск, Россия, 163020), *tataak@mail.ru*

Повсеместное распространение органогалогенов в качестве естественного компонента органического вещества и долгосрочное использование искусственных промышленных органогалогенов способствовало их накоплению во всех оболочках Земли. В статье приведены результаты рекогносцировочных исследований содержания галогенорганических соединений в озерах, расположенных в субарктической климатической зоне на территории Архангельской и Мурманской областей. Содержание органогалогенов в природной воде оценивали по параметру «концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений». Анализ данных, полученных при проведении рекогносцировочных исследований, показал, что для каждого водного объекта характерно индивидуальное значение концентрации адсорбируемых галогенорганических соединений. В пресных озерах, находившихся под прямым влиянием морской среды, средние значения концентраций адсорбируемых органических соединений изменялись в диапазоне от $0,048 \pm 0,008$ до $0,231 \pm 0,023$ мг/дм³. Минимальное значение было зафиксировано в пресном оз. Банное/Малые Хрусломены на о. Оленьем (Кандалакшский залив), максимальное – в оз. Малом Каменном. В меромиктическом оз. Мертвом на о. Большом Соловецком концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений не превысила $0,138 \pm 0,014$ мг/дм³. Сравнение результатов исследования пресных озер с различной удаленностью от Белого моря показало, что средние значения концентраций адсорбируемых галогенорганических соединений в озерах, находившихся под прямым влиянием моря, в три и более раз выше, чем в озерах, отдаленных от моря.

Ключевые слова: концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений; озера; Архангельская и Мурманская области; природная вода; Белое море; рекогносцировочные исследования

Для цитирования: Королева Т. А., Вахрамеева Е. А., Коробицына Р. Д. Рекогносцировочные исследования содержания галогенорганических соединений в озерах Архангельской и Мурманской областей // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 14–24. doi: 10.17076/lim2137

T. A. Koroleva*, E. A. Vakhrameeva, R. D. Korobitsyna. RECONNAISSANCE STUDIES OF ORGANOHALIDES IN LAKES OF THE ARKHANGELSK AND MURMANSK REGIONS

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20 Nikolsky Ave., 163020 Arkhangelsk, Russia), *tataak@mail.ru*

The ubiquity of organohalides as a natural component of organic matter, as well as the long-term use of industrial organohalides have resulted in the accumulation of these compounds in all spheres of the Earth. This paper presents the results of reconnaissance surveys for the content of organohalides in lakes located in the subarctic climatic zone of the Arkhangelsk and Murmansk Regions. The metric for the content of organohalides in natural water was the concentration of adsorbable organically bound halogens (AOX). Analysis of the data from the reconnaissance surveys showed that the adsorbable organohalide concentrations were specific to each individual water body. The average AOX concentrations in freshwater lakes directly influenced by the marine environment ranged from 0.048 ± 0.008 to 0.231 ± 0.023 mg/dm³. The lowest value was recorded in the freshwater Lake Bannoe/Malye Khruslomeny on Oleniy Island (Gulf of Kandalaksha), and the highest – in Lake Maloe Kamennoe. The AOX concentration in the meromictic Lake Myortvoe on Bolshoy Solovetsky Island did not exceed 0.138 ± 0.014 mg/dm³. A comparison of the results for freshwater lakes situated at different distances from the White Sea showed that the average AOX concentrations in lakes under immediate marine influence were three or more times higher than in lakes located farther away from the sea.

Keywords: adsorbable organic halogen concentrations; lakes; Arkhangelsk and Murmansk Regions; natural waters; White Sea; reconnaissance surveys

For citation: Koroleva T. A., Vakhrameeva E. A., Korobitsyna R. D. Reconnaissance studies of organohalides in lakes of the Arkhangelsk and Murmansk Regions. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 14–24. doi: 10.17076/lim2137

Введение

В настоящее время хорошо известно, что хлор-, бром-, йод-, фторорганические соединения повсеместно распространены в окружающей среде, они продуцируются морскими и пресноводными водорослями, губками, кораллами, мшанками, голожаберниками, грибами, бактериями; наземными растениями, грибами, бактериями; насекомыми, высшими животными, а также эти соединения образуются в результате абиотических процессов (извержения вулканов, лесных пожаров, геотермальных явлений) [Gribble, 2023]. К 2023 году было идентифицировано около 8000 галогенорганических соединений (ГОС) природного происхождения [Gribble, 2023].

Однако долгое время в научном сообществе считалось, что присутствие ГОС в природных объектах свидетельствует об их загрязнении, поскольку природу появления этих соединений связывали исключительно с антропогенными источниками. Только с 1994 года в информационном поле появились многочисленные обзоры общего и узкоспециализированного характера, посвященные

ГОС естественного/природного происхождения [Gribble, 2023].

В международной практике для определения общего количества ГОС в воде наиболее широкое применение получил метод, основанный на выполнении нескольких последовательных процессов: адсорбции ГОС активированным углем с последующей промывкой для удаления оставшихся галогенидов; высокотемпературного сжигания в потоке кислорода (в аэробных условиях) и/или термогидролиз (в анаэробных условиях) для полного преобразования адсорбированных на активированном угле ГОС в газообразное состояние; детектирования галогенидов в акцепторном растворе при использовании микрокулометрии и/или ионной хроматографии [Chen et al., 2020; Yang et al., 2024].

Впервые этот метод был разработан в Германии в 1970-х гг. для оценки содержания ГОС в питьевой воде, но активное применение он получил в 1990-х гг. в качестве инструмента контроля загрязняющих веществ в промышленных сточных водах. Более 25 лет в странах Европы, США, Китае сброс органогалогенов в окружающую среду для предприятий текстильной,

кожевенной, кузнечно-литейной, целлюлозно-бумажной промышленности, производства органических и неорганических химикатов и полимеров, переработки черных металлов, а также для общих систем очистки и управления сточными водами и др. контролируется с помощью параметра «концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений (АОГ)». Для каждого промышленного сектора разработаны нормативы сброса на единицу готовой продукции, приведенные в специальных справочниках, для стран Европы это справочники по наилучшим доступным технологиям (The Reference Document on Best Available Techniques (BREF)), для Соединенных Штатов Америки это действующие правила (Existing Regulations), разработанные агентством по охране окружающей среды (Environmental Protection Agency). В Китае содержание ГОС в сточных водах ограничивается концентрацией АОГ, пограничные значения которой приведены в национальных стандартах промышленных сбросов [Zhang et al., 2015].

Безусловно, введение параметра АОГ в систему производственного и государственного экологического контроля экономически обосновано, поскольку он позволяет заменить трудоемкие и дорогостоящие процедуры по определению индивидуальных соединений. Кроме того, величина параметра АОГ позволяет оценить общее количество как идентифицированных, так и неизвестных загрязняющих органических соединений в сточных водах.

В природной воде компонентный состав ГОС объединяет в себе соединения и природного, и антропогенного происхождения, вследствие чего оценить антропогенную составляющую по значению концентрации АОГ невозможно. Кроме того, образование ГОС и их накопление в водных объектах зависит от ряда факторов: географических и морфометрических характеристик объекта; интенсивности гидрохимических процессов и активности биоты как в самом водном объекте, так и на его водосборной территории. Многие из этих факторов отличаются изменчивостью в течение календарных и межгодовых периодов, усиливая или ослабляя процессы образования и поступления ГОС в компоненты окружающей среды. Несмотря на данные обстоятельства, с 2015 года параметр «концентрация АОГ» был внесен в перечень загрязняющих веществ для водных объектов, что подразумевает применение мер государственного регулирования в области охраны окружающей среды. Это, в свою очередь, влечет за собой определение и введение предельно допустимой концентрации для водных объек-

тов. Однако в России доступной и объективной информации о концентрации АОГ в природной воде, ее межсезонной и межгодовой стабильности или изменчивости практически нет.

Таким образом, для осуществления грамотного и сбалансированного подхода к законодательному регулированию параметра АОГ в водных объектах в первую очередь необходимы исследования концентрации АОГ в течение межсезонных и межгодовых периодов.

В представленной работе приведены результаты рекогносцировочных исследований концентрации АОГ в озерах, расположенных на территории Архангельской и Мурманской областей, которые различаются степенью удаленности от Белого моря и уровнем воздействия антропогенной нагрузки.

Материалы и методы

Архангельская и Мурманская области находятся в субарктической климатической зоне. Территории областей расположены в зоне избыточного увлажнения с густой и разветвленной речной сетью, многочисленными озерами и болотами. Положительный водный баланс обеспечивает повышенный сток при наличии даже небольших уклонов местности. Основным источником питания рек и озер – талые снеговые и дождевые воды. Главная доля стока приходится на период весеннего половодья. Самые низкие величины стока наблюдаются зимой. Климат формируется в условиях малого количества солнечной радиации зимой под влиянием северных морей и интенсивного западного переноса, обеспечивающего вынос влажных морских масс воздуха с Атлантического океана.

Большая часть Мурманской области расположена за Северным полярным кругом, и на ее территории преобладает субарктический морской климат. Архангельская область имеет более разнообразный климат, включая умеренно-континентальный на юге, субарктический на северо-востоке и с морским влиянием на северо-западе.

Для исследования были выбраны озера на западе Архангельской области в Онежском заливе Белого моря на о. Большом Соловецком: Святое, Питьевое, Варваринское, Мертвое, Малое Каменное, Большое Каменное (рис. 1). Климат на Соловецких островах умеренно-холодный, морской, с чертами континентального. Озера питаются атмосферными осадками и подземными водами, часть связаны каналами, формируя сложную гидрологическую сеть с контрастными характеристиками [Отчет..., 1989].



Рис. 1. Карта-схема исследованных водных объектов, расположенных на территории Большого Соловецкого острова

Fig. 1. Schematic map of the studied water bodies located on the territory of the Bolshoy Solovetsky Island

Большой Соловецкий остров находится на значительном расстоянии от материка, ближайшее расстояние до Онежского полуострова составляет 40 км и 60 км до города Кеми в Карелии. Исследованные озера не испытывали какого-либо прямого антропогенного влияния, в настоящее время они подвержены только рекреационному воздействию (туристические прогулки, купание местных жителей и туристов, домашних животных и скота, рыбная ловля). В ходе экспедиции обнаружено, что оз. Святое дополнительно подвержено влиянию стока воды с взлетно-посадочной полосы. Озеро Варваринское, ввиду его отдаленного местонахождения, испытывает минимальное воздействие рекреационной нагрузки. Следует отметить, что оз. Малое Каменное находится в юго-восточной части острова, для которой характерными являются болота и торфяники.

В Мурманской области в Кандалакшском заливе на о. Оленьем были проанализированы пробы воды из пресного оз. Банного (Малые Хрусломены). Этот водный объект до 1854 года через канал соединялся с оз. Большие Хрусломены, которое имело сообщение с морем. В 1854 г. ввиду потребности в пресной воде для

заправки паровых машин оз. Банное было изолировано от оз. Большие Хрусломены искусственно созданной фильтрующей дамбой. Таким же способом было отделено от моря и оз. Большие Хрусломены (рис. 2) [Чуднов, 1926]. Все водоемы на острове образовались в результате подъема суши из морского залива и постепенного опреснения стоками талых, дождевых и болотных вод [Карпович, 1984].

Озера различаются между собой морфологическими и морфометрическими характеристиками, но все они являются малопроточными с малыми удельным водосбором и величиной условного водообмена. Озерные воды насыщены кислородом (до 12 мг/дм³), минерализация низкая (менее 0,2 г/дм³), для озер в Каргопольском и Коношском районах преимущественно гидрокарбонатно-кальциевая, для озер Большого Соловецкого острова и оз. Банного – гидрокарбонатно-натриевая [Беспалая, Болотов, 2006].

Объекты на юго-западе Архангельской области были исследованы ранее [Королева и др., 2023], результаты этой работы используются для сравнения с вновь полученными данными для озер, расположенных на о-вах Большом Соловецком и Оленьем.

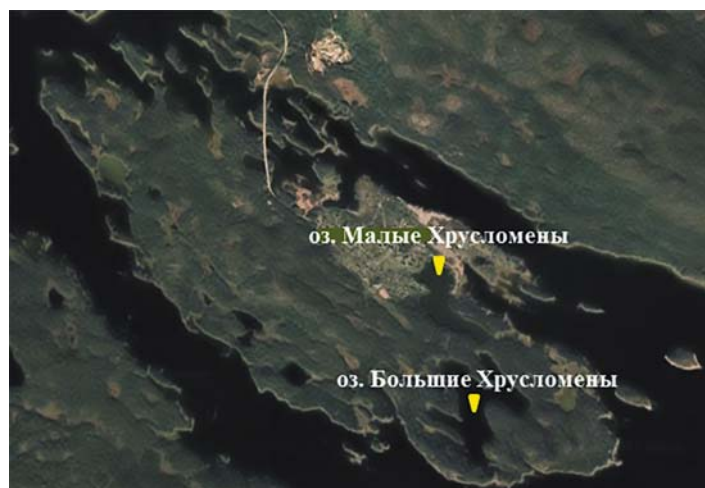


Рис. 2. Карта-схема исследованных озер, расположенных на территории о. Оленьего Мурманской области

Fig. 2. Schematic map of the studied lakes located on the territory of Oleniy Island, Murmansk Region

Изученные ранее водные объекты – оз. Нижнее-Верхнее в Коношском районе и озера Масельгское, Саргозеро и Вильно в Каргопольском районе (рис. 3) находятся под влиянием условий умеренно-континентального климата [Королева и др., 2023]. На водосборной территории оз. Нижнего в прошлом многие десятилетия размещалась промплощадка лесозавода, где для антисептирования пиломатериалов применялся отечественный хлорфенольный биоцид. Почвы промплощадки до сих пор слу-

жат источником поступления токсичных хлор-органических соединений в озера Нижнее и Верхнее. Озера в Каргопольском районе принадлежат Кенозерскому национальному парку федерального значения и исторически не подвергались какому-либо прямому антропогенному воздействию [Королева и др., 2023].

Пробы воды для определения параметра АОГ отбирались сотрудниками ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН в разные временные промежутки: в Каргопольском и Коношском районах в 2011–2019 гг.



Рис. 3. Карта-схема исследованных водных объектов, расположенных на территории Архангельской области: а) Каргопольский район; б) Коношский район

Fig. 3. Schematic map of the studied water bodies located in the Arkhangelsk Region: а) Kargopolsky District; б) Konoshsky District



(март, июнь, июль, октябрь); на о. Большом Соловецком в июле 2021 и 2022 гг.; на о. Оленьем в июле 2024 года.

Процедура отбора проб воды соответствовала ГОСТ 31861-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб». Пробы консервировались путем добавления концентрированной азотной кислоты до pH 2,0–2,5. При отборе воды контролировали значения температуры, pH и удельной электропроводности. pH измеряли с помощью pH-метра pH231 в соответствии с методикой, приведенной в РД 52.24.495-2017 «Водородный показатель вод. Методика измерений потенциометрическим методом». Температуру фиксировали портативным оксиметром HQ30D.99, удельную электропроводность – кондуктометром EC232. При определении температуры и удельной электропроводности воды приборы использовались в соответствии с приложенными к ним инструкциями.

Определение концентрации АОГ в озерной воде проводили по аттестованной методике ФР.1.31.2021.40350 «Методика измерений массовых концентраций адсорбируемых органически связанных галогенов (АОХ) в пробах питьевых, природных и сточных вод методом микрокулонометрического титрования», разработанной на основе ISO 9562 в аккредитованной лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН. Суть метода заключается в адсорбции галогенов (Cl, Br, I, F) из пробы воды на активированном сверхчистом угле с последующим сжиганием угля в потоке кислорода при температуре 950–1000 °С и измерении массовой концентрации выделившихся галогенов методом кулонометрического титрования в ячейке анализатора multi X 2500 (Analytik Jena, Германия). Концентрации АОГ выражали в единицах мг/дм³ с пересчетом на хлор. Согласно методике, содержание неорганического хлорида в пробах воды не должно превышать 1 г/дм³. Для всех исследуемых водных объектов содержание хлорид-ионов не превысило 1 г/дм³, интервал варьирования составил от 7 до 60 мг/дм³.

Результаты и обсуждение

Исследуемые объекты можно разделить на две группы: «условно чистые» – к ним относятся озера Масельское, Саргозеро и Вильно в Каргопольском районе, озера на Большом Соловецком острове – Святое, Питьевое, Варваринское, Мертвое, Малое Каменное, Большое Каменное, оз. Банное в Кандалакшском заливе; ко второй группе водных объектов, испытывающих антропогенное влияние, можно отнести систему оз. Нижнего-Верхнего в Коношском районе.

Озера на о. Большом Соловецком и о. Оленьем, включенные в группу «условно чистых» озер, расположены в непосредственной близости к Белому морю. В таблице 1 приведены максимальные глубины в этих озерах, значения pH и электропроводности в пробах воды на различной глубине.

Уровень pH в воде исследованных озер изменялся от слабокислого до сильнощелочного. В оз. Банном в период отбора проб в июле 2024 г. pH воды был сильнощелочным (9,7–9,9), в это время визуально наблюдался процесс активного «цветения» озера. Слабокислая среда в воде (pH 4,7–4,9) зафиксирована в единственном из исследованных озер – Малом Каменном, питание этого озера происходит за счет воды, поступающей с заболоченной близлежащей водосборной территории (рис. 4). Хорошо известно, что болотные торфяники являются аккумулятором гумусового вещества и ГОС [Leri, Ravel, 2015; Lijuan, Baoliang, 2017; Gribble, 2023], а повышенное содержание органического вещества в воде является причиной снижения pH [Чупакова и др., 2017]. Например, в болотной воде, отобранной в июле 2023 г. в Иласском болотном комплексе в 30 км от Архангельска, pH не превышал значений 3,8–4,1, при этом концентрация АОГ была высокой и составляла 0,95–1,00 мг/дм³. В остальных озерах вода имела среду, близкую к нейтральной. Разницу в ландшафте прибрежных территорий оз. Банного и Малого Каменного можно увидеть на фотографиях, приведенных на рис. 4 и 5.

Все исследованные озера, кроме оз. Мертвого, являются пресными. Озеро Мертвое, в котором зарегистрированы высокие значения удельной электропроводности (табл. 1), имеет статус прибрежного морского меромиктического водоема [Краснова, 2021], его происхождение явилось результатом поднятия береговой зоны Белого моря [Нинбург, 1990; Пантюлин, Краснова, 2011].

Значения концентраций АОГ в воде озер о. Большого Соловецкого изменялись в диапазоне от 0,071 до 0,303 мг/дм³, на о. Оленьем – от 0,039 до 0,062 мг/дм³ (табл. 2). Высокие значения, более 0,200 мг/дм³, зарегистрированы в единственном из исследованных объектов – оз. Малом Каменном (табл. 2). Как описано ранее, питание озера обеспечивается болотной водой со слабокислым pH среды, насыщенной органическим веществом и ГОС, что, возможно, и является причиной повышенных значений АОГ. Наиболее низкие значения концентрации АОГ были определены в воде оз. Банного на о. Оленьем.

Таблица 1. Значения pH и электропроводности в воде озер, расположенных на о-вах Большом Соловецком и Оленьем

Table 1. Values of pH and electrical conductivity in the water of lakes located on Bolshoy Solovetsky Island and Oleniy Island

Название озера Name of the lake	Период отбора Sampling period	Глубина, м Depth, m	pH	Электропроводность, мкСм/см Electrical conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$
о. Большой Соловецкий Bolshoy Solovetsky Island				
Святое Svyatoye	июль/July 2021	0,5	7,1	63,0
		5,5	6,8	63,2
		9,5	6,6	67,2
Питьевое Pit'evoye	«	0,5	7,7	60,1
		4,0	7,6	56,0
		6,0	7,2	55,4
Малое Каменное Maloe Kamennoye	июль/July 2022	0,5	4,9	49,6
		1,0	4,9	49,7
		2,5	4,7	49,7
		9,0	4,7	51,8
Большое Каменное Bol'shoye Kamennoye	«	1,0	6,9	53,2
		4,0	5,6	44,9
		12,0	5,5	46,9
Мертвое Mertvoye (Dead)	«	0,5	8,3	4480
		2,0	7,8	7011
		4,0	7,2	21000
Варваринское Varvarinskoye	«	0,5	8,2	190
		2,5	7,8	187
		8,0	7,3	292
о. Олений, Кандалакшский залив Oleniy Island, Kandalaksha Bay				
Банное (станция №1) Vannoye (station no. 1)	август/August 2024	0,5	9,7	174
		3,0	9,1	180
		5,0	6,8	182
Банное (станция №2) Vannoye (station no. 2)	«	0,5	9,9	185



Рис. 4. Озера Питьевое и Малое Каменное на о. Большом Соловецком (Онежский залив Белого моря, Архангельская область)

Fig. 4. Lakes Pit'evoye and Maloe Kamennoye on Bolshoy Solovetsky Island (Onega Bay of the White Sea, Arkhangelsk Region)



Рис. 5. Озеро Банное и прибрежная территория на о. Оленьем (Кандалакшский залив Белого моря, Мурманская область)

Fig. 5. Lake Bannoe and the coastal area on Oleniy Island (Kandalaksha Bay of the White Sea, Murmansk Region)

Характер распределения концентрации АОГ по глубине для каждого отдельного озера равномерный. Практически во всех озерах разница в значениях концентрации АОГ между слоями воды не превышает границы относительной погрешности измерения и составляет 15–17 %, что позволяет использовать усредненные значения для анализа полученных данных.

Исследованные озера находятся под прямым влиянием Белого моря, крупнейшего резервуара хлорированных, бромированных, в меньшей степени йодированных и фторированных органических соединений [Ballschmiter, 2003; Moore, 2003; Vidleman et al., 2019; Yu, Li, 2021]. Сочетание ветровых процессов и атмосферной динамики в пограничном слое морской среды способствует переносу галогенов с аэрозолями и газами на близлежащие территории, которые в дальнейшем вовлекаются в геохимический цикл ГОС [Fuge, Johnson, 2015; Limoges et al., 2024]. Однако сравнение диапазона средних концентраций группы озер на о. Большом Соловецком, за исключением оз. Малого Каменного (0,085–0,138 мг/дм³), и среднего значения, рассчитанного для оз. Банного на о. Оленьем (0,048 мг/дм³), показало значимые различия в содержании ГОС примерно в 2–3 раза (табл. 2).

Существенная разница в концентрации АОГ в озерах, одинаково приближенных к морю, свидетельствует о том, что содержание ГОС индивидуально для каждой водной экосистемы и может варьировать в широком диапазоне. Относительно высокое содержание ГОС в озерах о. Большого Соловецкого может быть связано с более богатой растительностью поверхностного почвенного слоя на водосборной территории и, как следствие, с более благоприятными условиями для активности биоты и накопления ГОС в компонентах окружающей среды по сравнению с озером на о. Оленьем. На рис. 5 видно, что прибрежная территория о. Оленьего окружена обнаженными древнейшими горными породами, устойчивыми к водной и ветровой эрозии. Различия ландшафтных условий на водосборах приводят к формированию озер с различной экосистемой на островах Большом Соловецком и Оленьем.

Результаты более ранних исследований (2011–2019 гг.) концентрации АОГ в озерах Каргопольского и Коношского районов (юго-западная часть Архангельской области), удаленных от моря, показали [Королева и др., 2023], что содержание АОГ в «условно чистых» озерах изменялось в достаточно широком интервале от 0,010 до 0,045 мг/дм³. Средние значения концентрации в исследованных озерах

Таблица 2. Значения концентрации АОГ в природной воде озер, расположенных на о-вах Большом Соловецком и Оленьем

Table 2. Values of AOX concentration in natural water of lakes located on Bolshoy Solovetsky Island and Oleniy Island

Название озера Name of the lake	Период отбора Sampling period	Глубина, м Depth, m	Концентрация АОГ, мг/дм ³ AOX concentration, mg/dm ³	Среднее значение концентрации АОГ, мг/дм ³ Average value of AOX concentration, mg/dm ³
о. Большой Соловецкий Bolshoy Solovetsky Island				
Святое Svyatoye	июль/July 2021	0,5	0,103 ± 0,016	0,110 ± 0,008
		5,5	0,106 ± 0,016	
		9,5	0,120 ± 0,018	
Питьевое Pit'evoye	«	0,5	0,092 ± 0,016	0,093 ± 0,010
		4,0	0,089 ± 0,015	
		6,0	0,099 ± 0,017	
Малое Каменное Maloye Kamennoye	июль/July 2022	0,5	0,075 ± 0,008	0,231 ± 0,023
		1,0	0,260 ± 0,026	
		2,5	0,303 ± 0,030	
		9,0	0,286 ± 0,029	
Большое Каменное Bol'shoye Kamennoye	«	1,0	0,087 ± 0,009	0,112 ± 0,011
		4,0	0,116 ± 0,012	
		12,0	0,132 ± 0,013	
Мертвое Mertvoye (Dead)	«	0,5	0,147 ± 0,015	0,138 ± 0,014
		2,0	0,173 ± 0,017	
		4,0	0,094 ± 0,009	
Варваринское Varvarinskoye	«	0,5	0,096 ± 0,010	0,085 ± 0,008
		2,5	0,089 ± 0,009	
		8,0	0,071 ± 0,007	
о. Олений, Кандалакшский залив Oleniy Island, Kandalaksha Bay				
Банное (станция №1) Bannoye (station no. 1)	август/August 2024	0,5	0,039 ± 0,007	0,048 ± 0,008
		3,0	0,054 ± 0,010	
		5,0	0,062 ± 0,011	
Банное (станция №2) Bannoye (station no. 2)	«	0,5	0,042 ± 0,007	
		3,0	0,043 ± 0,007	

составили 0,014–0,017 мг/дм³. В системе озер Нижнего-Верхнего, где почвы водосбора являются источником поступления токсичных хлор-органических соединений, параметр АОГ варьировал в диапазоне от 0,012 до 0,088 мг/дм³, при средней концентрации 0,021 (оз. Нижнее) и 0,016 мг/дм³ (оз. Верхнее). Максимальная величина АОГ (0,088 мг/дм³) зарегистрирована в период «цветения» воды в озере. При этом разница между средними концентрациями АОГ в «условно чистых» озерах и в озере, подвергнутому антропогенному воздействию, оказалась несущественной. Содержание АОГ в пробах было непостоянным и зависело от интенсивности внутриводоемных процессов, связанных с изменяющимися климатическими условиями [Королева и др., 2023]. Сравнение полученных данных в исследованных объектах показало, что в озерах, находившихся в непосредственной близости к Белому морю на островах Большом Соловецком и Оленьем,

концентрация АОГ в три и более раз выше, чем в удаленных от моря озерах, расположенных на территории Каргопольского и Коношского районов.

Закключение

Результаты рекогносцировочных исследований свидетельствуют о том, что содержание ГОС в воде озер, расположенных в субарктической климатической зоне, с различной удаленностью от Белого моря и антропогенной нагрузкой индивидуально для каждого объекта. Климатические условия могут как способствовать накоплению ГОС в компонентах окружающей среды, так и препятствовать ему, что впоследствии влияет на концентрацию органогамогенов в водных объектах. Средние значения концентрации АОГ в воде пресных озер на островах Большом Соловецком и Оленьем выше в 3 и более раз, чем в озерах, удаленных от моря,

на территории Каргопольского и Коношского районов Архангельской области.

Безусловно, для понимания механизмов формирования, а также межгодовой и сезонной изменчивости концентрации АОГ в водных объектах необходимы комплексные долгосрочные исследования, которые позволят осуществить грамотный подход в формировании природоохранных законодательных мер в отношении параметра АОГ.

Литература

Беспалая Ю. В., Болотов И. Н. Локальные фауны моллюсков Европейского Севера России: озера острова Большой Соловецкий // Вестник Поморского университета. 2006. Т. 2, № 10. С. 36–46.

Карпович В. Н. Кандалакшский заповедник. Мурманск: Мурман. кн. изд-во, 1984. 158 с.

Королева Т. А., Вельямидова А. В., Колпакова Е. С. Интегральный параметр контроля качества воды – концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 8. С. 36–41. doi: 10.18412/1816-0395-2023-8-36-41

Краснова Е. Д. Экология меромиктических озер России. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 3. С. 322–333. doi: 10.31857/S0321059621030093

Нинбург Е. А. Долгая губа: изоляция естественная и искусственная // Природа. 1990. № 7. С. 44–49.

Отчет. Гидролого-гидрохимические исследования озер Б. Соловецкого острова / Под ред. Н. Л. Фроловой, Л. Е. Жидаревой. М.: СГИАПМЗ, 1989. 64 с.

Пантюлин А. Н., Краснова Е. Д. Отделяющиеся водоемы Белого моря: новый объект для междисциплинарных исследований // Геология морей и океанов: Мат-лы XIX Междунар. науч. конференции (школы) по морской геологии (Москва, 14–18 нояб. 2011 г.). М., 2011. Т. 3. С. 241–245.

Чуднов К. П. Глубокая губа и ее особенности // Соловецкие острова. 1926. № 2–3. С. 159–170.

Чупакова А. А., Чупаков А. В., Широкова Л. С., Забелина С. А., Морева О. Ю., Неверова Н. В. Биогенные элементы в водных объектах заболоченных ландшафтов тундры и северной тайги (Архангельская область) // Труды Института биологии внутренних вод РАН: Мат-лы докл. полевого семинара (ИБВВ РАН, 7–10 сент. 2017 г.). Ярославль, 2017. Вып. 79. С. 289–292.

Ballschmitter K. Pattern and sources of naturally produced organohalogens in the marine environment: biogenic formation of organohalogens // Chemosphere. 2003. Vol. 52, no. 2. P. 313–324. doi: 10.1016/S0045-6535(03)00211-X

Bidleman T., Andersson A., Jantunen L., Kucklick J., Kylin H., Letcher R., Tysklind M., Wong F. Review of halogenated natural products in Arctic, Subarctic and Nordic ecosystems // Emerg. Contam. 2019. Vol. 5. P. 89–115. doi: 10.1016/j.emcon.2019.02.007

Chen B., Bu Y., Yang J., Nian W., Hao S. Methods for total organic halogen (TOX) analysis in water: past,

present, and future // Chem. Eng. J. 2020. Vol. 399(82). Art. 125675. doi: 10.1016/j.cej.2020.125675

Fuge R., Johnson C. C. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review // Appl. Geochem. 2015. Vol. 63. P. 282–302. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.09.013

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – A comprehensive review // Progress in the Chemistry of Organic Natural Products. 2023. Vol. 121. P. 1–546. doi: 10.1007/978-3-031-26629-4_1

Leri A. C., Ravel B. Abiotic bromination of soil organic matter // Environ. Sci. Technol. 2015. Vol. 49, iss. 22. P. 13350–13359. doi: 10.1021/acs.est.5b03937

Lijuan J., Baoliang C. Natural origins, concentration levels, and formation mechanisms of organohalogens in the environment // Prog. Chem. 2017. Vol. 29, iss. 9. P. 1093–1114. doi: 10.7536/PC170563

Limoges A., Piazzola J., Yohia C., Rodier Q., Bruch W., Canepa E., Sagaut P. Study of the atmospheric transport of sea-spray aerosols in a coastal zone using a high-resolution model // Atmosphere. 2024. Vol. 15(6). Art. 702. doi: 10.3390/atmos15060702

Moore R. M. Marine sources of volatile organohalogens // The Handbook of Environmental Chemistry. 2003. Vol. 3. P. 85–101. doi: 10.1007/b10449

Yang J., Li J., Tan X., Li J., Croué J. P., Chen B. Insights into adsorbable organic halogen analysis: Two overlooked factors impacting water quality assessment // Sci. Total Environ. 2024. Vol. 928. Art. 172429. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172429

Yu Z., Li Y. Marine volatile organic compounds and their impacts on marine aerosol – A review // Sci. Total Environ. 2021. Vol. 768. Art. 145054. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145054

Zhang B., Xian Q., Zhu J., Li A., Gong T. Characterization, DBPs formation, and mutagenicity of soluble microbial products (SMPs) in wastewater under simulated stressful conditions // Chem. Eng. J. 2015. Vol. 279. P. 258–263. doi: 10.1016/j.cej.2016.04.014

References

Ballschmitter K. Pattern and sources of naturally produced organohalogens in the marine environment: biogenic formation of organohalogens. *Chemosphere*. 2003;52(2):313–324. doi: 10.1016/S0045-6535(03)00211-X

Bespалaya Yu. V., Bolotov I. N. Local faunas of mollusks of the European North of Russia: lakes of Bolshoy Solovetsky Island. *Vestnik Pomorskogo universiteta = Bulletin of the Pomor University*. 2006;2(10):36–46. (In Russ.)

Bidleman T., Andersson A., Jantunen L., Kucklick J., Kylin H., Letcher R., Tysklind M., Wong F. A Review of halogenated natural products in Arctic, Subarctic and Nordic ecosystems. *Emerg. Contam.* 2019;5:89–115. doi: 10.1016/j.emcon.2019.02.007

Chen B., Bu Y., Yang J., Nian W., Hao S. Methods for total organic halogen (TOX) analysis in water: past, present, and future. *Chem. Eng. J.* 2020;399(82):125675. doi: 10.1016/j.cej.2020.125675

Chudnov K. P. Deep Bay and its features. *Solovetskie ostrova = Solovetsky Islands*. 1926;2–3:159–170. (In Russ.)

Chupakova A. A., Chupakov A. V., Shirokova L. S., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Neverova N. V. Nutrients in water bodies of wetland landscapes of tundra and Northern Taiga (Arkhangelsk Region). *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod RAN: Mat-ly dokl. polevogo seminar (IBV RAN, 7–10 sent. 2017 g.) = Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters RAS: Proceed. of the field seminar (IBW RAS, Sept. 7–10, 2017)*. Yaroslavl; 2017. Iss. 79. P. 289–292. (In Russ.)

Frolova N. L., Zhidareva L. E. (eds.). Report. Hydrological and hydrochemical studies of lakes of the Bolshoy Solovetsky Island. Moscow: SGIAPMZ; 1989. 64 c. (In Russ.)

Fuge R., Johnson C. C. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review. *Appl. Geochem.* 2015;63:282–302. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.09.013

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – A comprehensive review. *Progress in the Chemistry of Organic Natural Products.* 2023;121: 1–546. doi: 10.1007/978-3-031-26629-4_1

Karpovich V. N. Kandalaksha Nature Reserve. Murmansk: Murm. kn. izd-vo; 1984. 158 p. (In Russ.)

Koroleva T. A., Vel'yamidova A. V., Kolpakova E. S. Integral parameter of water quality control – concentration of adsorbed organohalogen compounds. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia.* 2023;27(8):36–41. (In Russ.). doi: 10.18412/1816-0395-2023-8-36-41

Krasnova E. D. Ecology of meromictic lakes of Russia. Coastal marine water bodies. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2021;48(3):322–333. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059621030093

Leri A. C., Ravel, B. Abiotic bromination of soil organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 2015;49(22): 13350–13359. doi: 10.1021/acs.est.5b03937

Lijuan J., Baoliang C. Natural origins, concentration levels, and formation mechanisms of organohalogens in the environment. *Prog. Chem.* 2017;29(9):1093–1114. doi: 10.7536/PC170563

Limoges A., Piazzola J., Yohia C., Rodier Q., Bruch W., Canepa E., Sagaut P. Study of the atmospheric transport of sea-spray aerosols in a coastal zone using a high-resolution model. *Atmosphere.* 2024;15(6):702. doi: 10.3390/atmos15060702

Moore R. M. Marine sources of volatile organohalogens. *The Handbook of Environmental Chemistry.* 2003;3:85–101. doi: 10.1007/b 10449

Ninburg E. A. Long Bay: natural and artificial isolation. *Priroda = Nature.* 1990;7:44–49. (In Russ.)

Pantulin A. N., Krasnova E. D. Separating reservoirs of the White Sea: a new object for interdisciplinary research. *Geologiya morei i okeanov: Mat-ly XIX Mezhdunar. nauch. konferentsii (shkoly) po morskoi geologii (Moskva, 14–18 noyab. 2011 g.) = Geology of the seas and oceans: Proceed. of the XIX int. scientific conf. (school) on marine geology (Moscow, Nov. 14–18, 2011)*. Moscow; 2011. Vol. 3. P. 241–245. (In Russ.)

Yang J., Li J., Tan X., Li J., Croué J. P., Chen B. Insights into adsorbable organic halogen analysis: Two overlooked factors impacting water quality assessment. *Sci. Total Environ.* 2024;928:172429. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172429

Yu Z., Li Y. Marine volatile organic compounds and their impacts on marine aerosol-A review. *Sci. Total Environ.* 2021;768:145054. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145054

Zhang B., Xian Q., Zhu J., Li A., Gong T. Characterization, DBPs formation, and mutagenicity of soluble microbial products (SMPs) in wastewater under simulated stressful conditions. *Chem. Eng. J.* 2015;279:258–263. doi: 10.1016/j.jes.2016.04.014

Поступила в редакцию / received: 14.07.2025; принята к публикации / accepted: 30.01.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Королева Татьяна Алексеевна

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

e-mail: tataak@mail.ru

Вахрамеева Елена Анатольевна

научный сотрудник

e-mail: vakhr-elena@yandex.ru

Коробицына Римма Дмитриевна

младший научный сотрудник

e-mail: rimma.korobitsyna@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Koroleva, Tatiana

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

Vakhrameeva, Elena

Researcher

Korobitsyna, Rimma

Junior Researcher

УДК 502.17

ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭКОСИСТЕМАХ МАЛЫХ ОЗЕР БАССЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ)

Е. С. Колпакова*, **А. В. Вельямидова**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (пр. Никольский, 20, Архангельск, Россия, 163020), *kolpelen@yandex.ru*

Представлены данные о содержании, распределении и компонентном составе хлорорганических соединений (хлорфенольных соединений и хлорированных бензолов), включая устойчивые, в экосистемах водоемов на разной стадии отделения от Белого моря. Проведены рекогносцировочные обследования на примере малых озер, расположенных на острове Оленьем в Кандалакшском заливе Белого моря (Мурманская область): пресного озера Банное (Малые Хрусломены) и меромиктического соленого озера Большие Хрусломены. Особенностью этих водоемов является связь с морем в прошлом и/или настоящем. Определение концентраций индивидуальных хлорорганических соединений проводили методом газовой хроматографии с электрозахватным детектированием. Выявлено присутствие в озерных осадках и почвах водосборных территорий хлорированных бензолов и хлорфенольных соединений, в том числе из группы стойких органических загрязнителей. Содержание стойких органических загрязнителей в донных осадках выявлено на уровне от 0,1 до 17,2 нг/г, в почвах – от < 0,1 до 11,8 нг/г. Хлорфенольные соединения в донных осадках определены в количествах от 0,022 до 0,256 мкг/г, в почвах – от 0,022 до 0,058 мкг/г. Показано, что компонентный состав и уровни хлорорганических соединений в донных осадках обследованных озер и почвах водосборных территорий обусловлены преимущественно природными источниками их образования при менее существенном вкладе источников, связанных с антропогенной деятельностью. Поступление стойких органических загрязнителей в почвы и озерные осадки обусловлено в основном атмосферным переносом от источников, связанных с процессами сжигания/горения различного вида органического сырья и отходов. Состав хлорфенольных соединений в донных осадках и почвах был представлен низкохлорированными фенолами и их производными и свидетельствовал о влиянии морских вод на протекание процессов трансформации хлорорганических соединений.

Ключевые слова: малые озера; Кандалакшский залив; Белое море; донные осадки; почвы; стойкие органические загрязнители; хлорфенольные соединения; газовая хроматография

Для цитирования: Колпакова Е. С., Вельямидова А. В. Хлорорганические соединения в экосистемах малых озер бассейна Белого моря (Кандалакшский залив) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 25–32. doi: 10.17076/lim2140

E. S. Kolpakova*, A. V. Velyamidova. ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN SMALL LAKE ECOSYSTEMS OF THE WHITE SEA BASIN (KANDALAKSHA BAY)

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (20 Nikolsky Ave., 163020 Arkhangelsk, Russia), *kolpelen@yandex.ru*

This article presents data on the concentrations, distribution, and composition of organochlorine compounds (chlorinated benzenes and chlorophenolic compounds), including persistent organochlorine pollutants, in the ecosystems of waterbodies at different stages of isolation from the White Sea. Reconnaissance studies were conducted using the example of small lakes located on Oleniy Island in the Kandalaksha Bay of the White Sea (Murmansk Region): the freshwater Lake Bannoye (Lake Malye Khruslomeny) and the meromictic salt Lake Bol'shiye Khruslomeny. A notable feature of these waterbodies is their connection with the sea in the past and/or present. The concentrations of individual organochlorine compounds were determined by gas chromatography with electron capture detection. The presence of chlorinated benzenes and chlorophenolic compounds, including those from the persistent organic pollutants category, was revealed in lake sediments and soils of the catchment areas. The concentrations of persistent organic pollutants varied from 0.1 to 17.2 ppb in bottom sediments, and from < 0.1 to 11.8 ppb in soils. The concentrations of chlorophenolic compounds were from 0.022 to 0.256 ppm in sediments, and from 0.022 to 0.058 ppm in soils. It was shown that the composition and concentrations of organochlorine compounds in sediments of the lakes and soils of their catchment areas are mainly governed by the natural formation sources of these compounds with a less significant contribution of sources associated with anthropogenic activity. The input of persistent organic pollutants into soils and lake sediments is mainly due to air-borne transport from emission sources associated with the combustion/burning of various types of organic raw materials and wastes. The composition of chlorophenolic compounds in the lake sediments and soils was represented by low-chlorinated phenols and their derivatives, and indicated the influence of seawater on the transformation of organochlorine compounds.

Keywords: small lakes; Kandalaksha Bay; White Sea; sediments; soils; persistent organic pollutants; chlorophenolic compounds; gas chromatography

For citation: Kolpakova E. S., Velyamidova A. V. Organochlorine compounds in small lake ecosystems of the White Sea basin (Kandalaksha Bay). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 25–32. doi: 10.17076/lim2140

Введение

Экосистемы Арктики и Субарктики отличаются слабой устойчивостью к различного вида воздействиям и крайне медленной скоростью восстановления. В настоящее время антропогенная нагрузка на акваторию и береговую зону Белого моря постоянно увеличивается [Wania, 2003]. Большую проблему по-прежнему представляет загрязнение природных экосистем этих северных территорий хлорорганическими соединениями (ХОС), в частности хлорсодержащими стойкими органическими загрязнителями (СОЗ), поступающими в результате как глобального переноса от удаленных, так и от местных источников их эмиссии [Stockholm, 2024]. Опасность этих соединений связана с их устойчивостью к разложению в природных средах, высокой липофильностью,

биоаккумуляционной способностью и многоплановым токсичным воздействием на живые организмы. Эти соединения разной степени летучести и липофильности способны к локальному, региональному и трансграничному переносу различными путями (с атмосферными потоками, морскими течениями, мигрирующими видами живых организмов) в высокоширотные районы, значительно удаленные от первоначальных источников [Wania, Mackay, 1995; AMAP..., 2018]. Считается, что негативное воздействие СОЗ на биоту и человека в условиях холодного климата северных территорий сильнее, чем в низких широтах [Wania, 2003], поскольку происходит их накопление/консервация в компонентах наземных и водных экосистем (почвах, донных отложениях, снежном покрове, толще льда) и биоусиление воздействия. При поступлении в водоем такие

вещества способны аккумулироваться в гидробионтах и передаваться по пищевой цепи, увеличивая свою концентрацию в каждом последующем звене, а также сорбироваться частицами органического вещества и попадать в донные отложения.

Присутствие хлорорганических соединений, их происхождение и накопление ранее связывали главным образом с техногенными факторами, однако к настоящему времени достоверно установлено, что образование ХОС происходит вследствие таких естественных процессов, как хлорирование органического вещества при взаимодействии с хлорид-ионами и ферментативное продуцирование [Gribble, 2004]. Одним из крупных биогенных источников ХОС являются морские экосистемы, где основная роль в их продуцировании принадлежит бурым и диатомовым водорослям, планктону, цианобактериям и пр.; в пресноводных водоемах активными продуцентами выступают диатомовые, зеленые и сине-зеленые водоросли. Наряду с естественным продуцированием (например, диатомовыми водорослями, планктоном, цианобактериями и пр.) в природных экосистемах протекают еще и биохимические процессы преобразования ХОС, при этом состав промежуточных и конечных продуктов определяется условиями среды: в анаэробных условиях образуются менее токсичные хлорированные производные, а в аэробных – более токсичные [Field, Sierra-Alvarez, 2007].

Белое море относится к внутренним морям Северного Ледовитого океана. Гляциоизостатическое и неотектоническое поднятие его береговой зоны приводит к постепенному отделению небольших водоемов [Romanenko, Shilova, 2012], в которых формируется уникальный гидролого-гидрохимический режим, обусловленный морфометрическими характеристиками, особенностями водообмена, соотношением поступающих объемов пресной и морской воды. Эти факторы определяют развитие водоема в направлении осолонения, опреснения или формирования меромиктической структуры. В процессе отделения водоема происходят значительные изменения водной биоты: морскую биоту сменяет комплекс видов, способных обитать в широком диапазоне солености воды, а также в пресноводной среде. Таким образом, подобные прибрежные водоемы, находящиеся на разных стадиях отделения от моря, являются уникальными объектами для изучения особенностей поведения хлорорганических соединений, в том числе стойких хлорорганических загрязнителей.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны малые озера (Банное и Большие Хрусломены), расположенные на острове Оленьем в Кандалакшском заливе Белого моря (рис. 1). Остров имеет естественное происхождение и является вторым по величине в Кандалакшском заливе. На юго-западе Оленьего имеются небольшие озера, в окрестности острова расположено множество небольших островов, округа богата лесом. В районе о. Оленьего достаточно глубокое морское побережье, защищенное от ветров, удобное для погрузки пиломатериалов на большие суда. В прошлом в ходе хозяйственного освоения территории расположенные рядом маленькие острова были объединены с о. Оленьим засыпкой мелководья опилками, досками, рейками и пр. При строительстве на острове крупного лесопильного завода (в конце XIX в.) возникла проблема обеспечения оборудования пресной водой. С этой целью проходы в заливах Малые и Большие Хрусломены, а также мелководье в районе залива Малые Хрусломены были завалены (укреплены) камнями – таким образом заливы были изолированы от моря и искусственно сформированы озера. Озеро Малые Хрусломены (современное название Банное) при этом постоянно использовалось как хранилище/источник пресной воды для технических целей. В то же время оз. Большие Хрусломены никогда не использовалось для каких-либо хозяйственных целей, поскольку практически сразу после отделения его от моря здесь стала развиваться меромиктическая структура из-за большой глубины озера и постоянной связи с морем через небольшой ручей.

Озеро Большие Хрусломены – меромиктическое с постоянным поступлением морских вод через проницаемые породы, имеет четко выраженную стратификацию; глубина озера достигает 21 м [Savichev et al., 2019]. Особенностью оз. Большие Хрусломены является его изоляция от моря искусственной валунной дамбой, которая ограничивает поступление воды из моря во время прилива и питание пресной водой за счет осадков и с водосбора. Озеро подвержено приливно-отливным течениям, в процессе которых морская вода переливается через дамбу, поступает в мелководную часть озера, где смешивается с опресненной водой верхних слоев, благодаря чему соленость наиболее опресненного слоя в озере поддерживается на уровне 6,5–7,3 г/л [Savichev et al., 2020]. В настоящее время поверхностный слой воды до глубины 2 м опреснен, под ним находится пикно-, гало- и хемоклин, основная

толща с глубины 4 м соленая, самый нижний слой мониомлимиона имеет морскую соленость и очень высокое содержание сероводорода (~500–600 мг/л) и метана (~30 мг/л) [Лосюк и др., 2019; Savvichev et al., 2020]. Озеро окружают каменистые берега, затем лесной массив хвойных и лиственных деревьев. Низкая и узкая перемычка, отделяющая оз. Большие Хрусломены от расположенного рядом оз. Банного, не исключает проникновение из последнего биогенных соединений, стимулирующих развитие водорослей и цианобактерий. Таким образом, в оз. Большие Хрусломены создается стабильное равновесие гидрохимических параметров, основанное на динамическом уравновешивании естественных процессов опреснения и заболачивания (за счет затрудненного водообмена с морем и поступления биогенных веществ с поверхностным стоком) и постоянного притока соленой морской воды (разбавляющей и обновляющей поверхностный слой). В озере произошло быстрое развитие застойных процессов по сравнению с водоемами, отделяющимися естественным путем за счет

поднятия суши. В нижних слоях озерной воды накопился сероводород и сформировалась устойчивая стратификация с развитием сообщества АФБ в освещенной зоне хемоклина [Lupina et al., 2003].

Озеро Банное, более 100 лет назад полностью изолированное от моря, является пресным водоемом; глубина озера достигает 5 м. Рядом с оз. Банным расположен поселок Лесозаводской. Население поселка малочисленно: в зимний период здесь проживает около 90 человек, в летний – чуть более 300. Промплощадка лесопильного завода (как потенциальный локальный источник загрязнения в прошлом) находится на отдалении от обследованных озер, на противоположной стороне жилого поселка. На данный момент лесопильный завод уже длительное время не функционирует, какое-либо другое промышленное производство также отсутствует. Карта-схема расположения исследуемых озер приведена на рис. 1.

Отбор образцов донных осадков и почв проводился сотрудниками лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА РАН

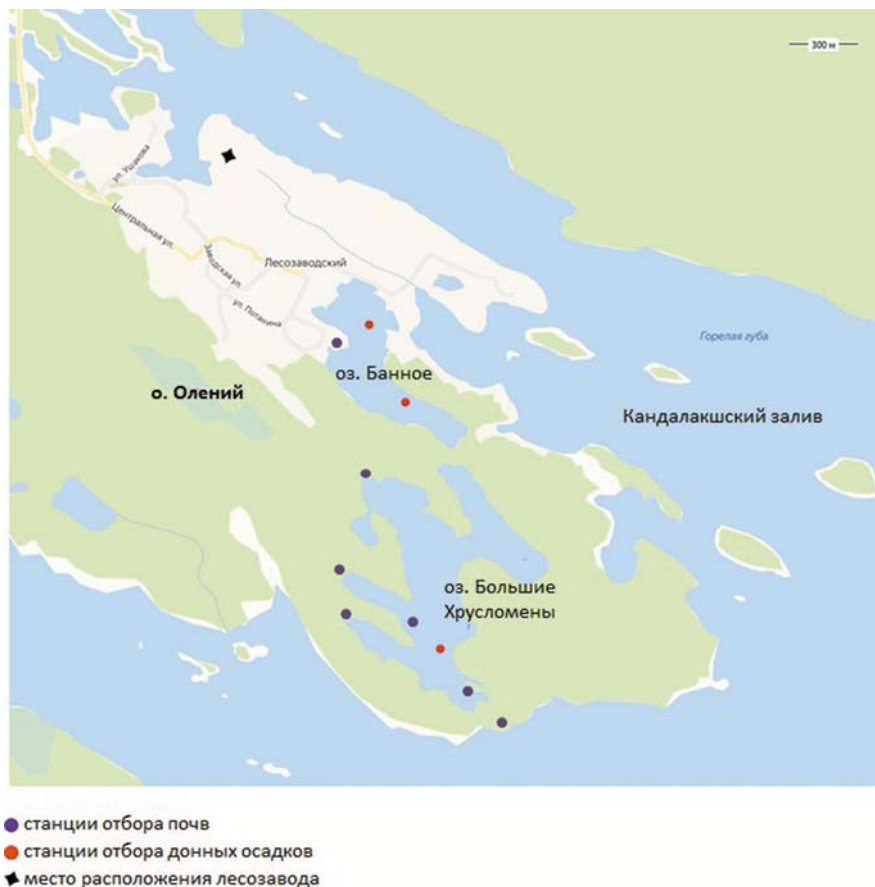


Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных озер

Fig. 1. Schematic map of the studied lakes

в ходе экспедиционных работ в марте 2019 и 2021 гг. и в июле 2024 г. Образцы донных осадков в оз. Большие Хрусломены были отобраны в наиболее глубокой части акватории озера. В оз. Банном осадки отбирались на двух станциях: глубоководной (станция 1) и вблизи поселка (станция 2). Для отбора донных осадков использовали дночерпатель Экмана-Берджа и ударную прямоточную грунтовую трубку Aquatic Research Instruments (США) с внутренним диаметром 50 мм, длиной 60 см. Длина керна осадков составляла 15 см. Образцы осадков сразу после отбора помещались в полиэтиленовые пакеты, из которых отжимался воздух для предотвращения окисления осадков.

Образцы почв на водосборной территории озер отбирали в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84. Поскольку данная территория каменистая, максимально возможная глубина отбора образцов почв не превышала 30 см.

В качестве целевых хлорорганических соединений были выбраны гексахлорбензол (ГХБ), пентахлорбензол (ПeХБ), пентахлорфенол (ПХФ) и пентахлоранизол (ПХА) из группы стойких органических загрязнителей, а также хлорфенольные соединения (ХФС).

Для извлечения индивидуальных соединений использовался метод ускоренной жидкостной проточной экстракции воздушно-сухой пробы донных осадков горячей смесью органических растворителей (гексан : ацетон) в соотношении 3:1, при температурах ниже точки кипения.

Полученный экстракт обрабатывали 0,2 н раствором гидроксида натрия (NaOH) для разделения кислых (ХФС) и нейтральных (ГХБ, ПeХБ и ПХА) соединений. Выделенную органическую фазу, содержащую соединения нейтрального характера, очищали от сопутствующих органических примесей многократной обработкой концентрированной серной кисло-

той (в случае донных осадков) или методом адсорбционной колоночной хроматографии с использованием многослойных колонок (в случае почв) с последующей идентификацией и количественным определением методом газовой хроматографии.

Определение концентраций ХФС (хлорированных фенолов и их производных) в легко- и трудноэкстрагируемых фракциях проводили в соответствии со стандартом ISO 14154:2005 методом газовой хроматографии. Для извлечения фракции легкоэкстрагируемых ХФС щелочной раствор соединений кислого характера реэкстрагировали гексаном. Остаток анализируемого образца донных осадков и почв после экстракции обрабатывали 10 М раствором NaOH, дополнительно выделяя фракцию трудноэкстрагируемых ХФС. Выделенные из каждой фракции хлорфенольные соединения дериватизировали уксусным ангидридом в слабощелочной среде.

Количественное определение и идентификацию ХОС проводили методом капиллярной газовой хроматографии с электронозахватным детектированием. Все концентрации даны в расчете на воздушно-сухой осадок. Нижний предел обнаружения индивидуальных ХОС – 0,0001 мкг/г (0,1 нг/г). Все концентрации представлены в расчете на воздушно-сухую пробу.

Результаты и обсуждение

Стойкие органические загрязнители (ГХБ, ПeХБ, ПХФ, ПХА) выявлены в донных осадках исследованных озер и в почвах на их водосборных территориях практически повсеместно.

В донных осадках концентрации СОЗ варьировали от < 0,1 до 17,2 нг/г с наибольшими значениями в осадках оз. Большие Хрусломены (табл.).

Содержание ХОС в донных осадках и почвах на водосборных территориях исследованных озер

Content of organochlorine compounds (OCs) in bottom sediments and soils in the catchment areas of the studied lakes

ХОС OCs	Донные осадки Bottom sediments		Почвы Soils	
	оз. Большие Хрусломены Lake Bol'shiye Khruslomeny	оз. Банное Lake Bannoye	оз. Большие Хрусломены Lake Bol'shiye Khruslomeny	оз. Банное Lake Bannoye
ГХБ, нг/г НСВ, ppb	9,1–17,2	2,4–8,4	0,6–11,8	10,1
ПeХБ, нг/г PeCB, ppb	0,6–1,4	0,2–0,7	<0,1–1,7	0,7
ПХФ, нг/г PCP, ppb	8,5–12,7	0,1–0,3	1,2–11,1	5,8
ПХА, нг/г PCA, ppb	0,1–0,2	<0,1	<0,1–1,1	не обнаружено not found
ХФС, мкг/г CPs, ppm	0,206–0,256	0,022–0,060	0,22 – 0,058	0,058

В озерных осадках в порядке убывания концентраций СОЗ располагались следующим образом: ГХБ ~ ПХФ > ПеХБ > ПХА в осадках оз. Большие Хрусломены и ГХБ > ПХФ ~ ПеХБ > ПХА в осадках оз. Банного (на двух станциях отбора донных осадков). В обоих случаях среди всех загрязняющих веществ в донных осадках преобладал ГХБ (2,4–17,2 нг/г), невысокими были концентрации ПеХБ (0,2–1,4 нг/г) и совсем незначительными – ПХА (не более 0,2 нг/г). В то же время практически на том же уровне, что и ГХБ, был определен ПХФ (от 0,1 до 12,7 нг/г). В большинстве своем в распределении загрязняющих веществ в осадках прослеживалась выраженная тенденция к снижению концентраций по глубине, тогда как вертикальное распределение ПХФ имело более равномерный характер. В соответствии с классификацией норвежских стандартов качества донных осадков [Pettersen, 2016] выявленные концентрации индивидуальных СОЗ в озерных осадках можно считать довольно низкими.

В почвах на водосборных территориях исследованных озер концентрации СОЗ оказались сопоставимы с найденными в донных осадках – от < 0,1 до 11,8 нг/г, при этом какая-либо явная закономерность в их пространственном распределении отсутствовала (табл.).

Аналогичным образом доминирующими загрязняющими веществами были ГХБ и ПХФ при незначительном содержании ПеХБ и ПХА.

Учитывая расположение озер и тот факт, что в настоящее время эти водоемы и их водосборные территории испытывают сравнительно слабую антропогенную нагрузку, поступление СОЗ в донные осадки и почвы в большей степени обусловлено атмосферным переносом (локальным, региональным и трансграничным) от источников, преимущественно связанных с процессами сжигания/горения различного вида органического сырья и отходов (например, бытовых и промышленных отходов, биомассы, всех видов топлива).

Содержание ХФС в донных осадках соленого оз. Большие Хрусломены оказалось на порядок выше по сравнению с осадками пресного оз. Банного – 0,206–0,256 и 0,022–0,060 мкг/г соответственно (табл.).

Компонентный состав ХФС в осадках оз. Большие Хрусломены представлен только хлорированными фенолами разной степени замещения, производные хлорфенолов в осадках не найдены. В составе ХФС в осадках оз. Большие Хрусломены (рис. 2) преобладали (47,2 %) монохлорфенолы, источниками которых являются природные процессы образования, такие

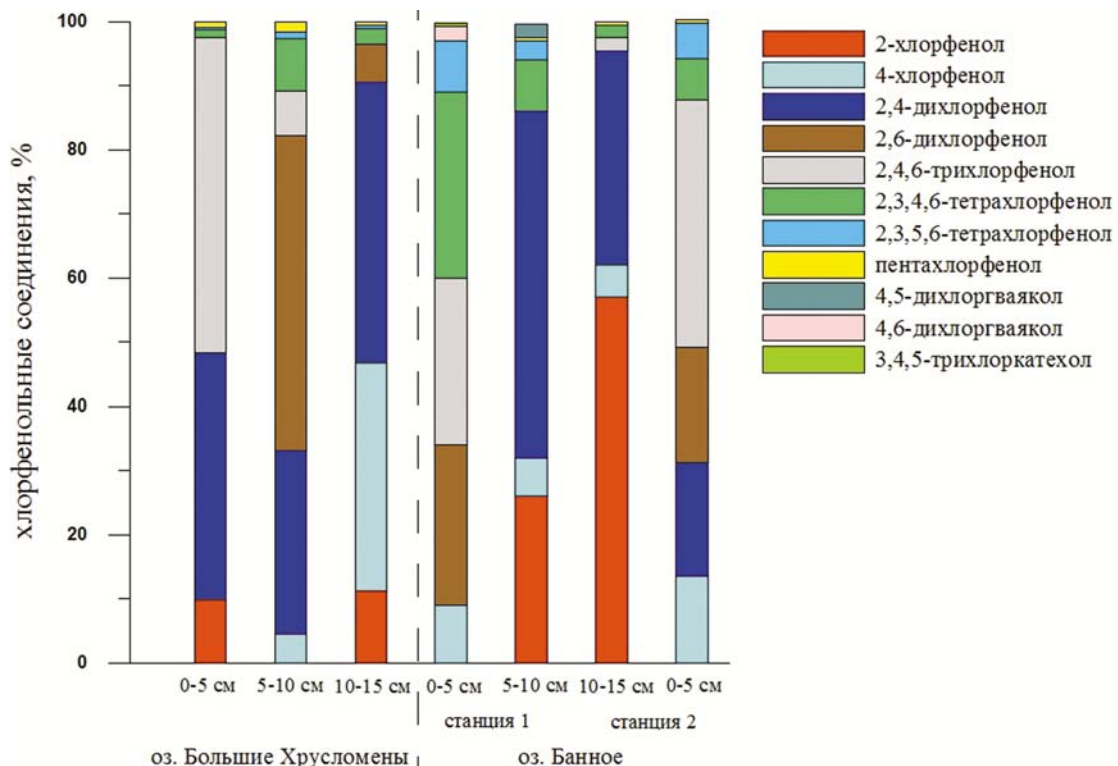


Рис. 2. Компонентный состав ХФС в осадках исследованных озер

Fig. 2. Component composition of CPs in sediments of the studied lakes

как ферментативное продуцирование [Gribble, 2004]. Вклад антропогенного ПХФ в сумму ХФС при этом составлял всего 4,1–5,3 %. Идентифицированные ХФС были определены в основном в трудноэкстрагируемой фракции, в небиодоступном для микробной деградации состоянии, что способствует их накоплению в осадках. Морские воды не благоприятствуют активности микробных сообществ, участвующих в процессах деградации/трансформации хлорорганических соединений [Field, Sierra-Alvarez, 2007]. Данные соединения могут быть природными метаболитами, образующимися в окружающей среде в результате энзиматических процессов [Gribble, 2023].

В осадках оз. Банного, наряду с хлорфенолами, определены еще их производные (рис. 2). ХФС были обнаружены в основном в легкоэкстрагируемой фракции, в биодоступном для микробной деградации состоянии. Доля трудноэкстрагируемых ХФС составляла в среднем 32,6 %. Состав ХФС в осадках оказался шире: наряду с хлорфенолами присутствовали еще их производные. В наибольших количествах выявлены моно- и дихлорфенолы. Из производных хлорфенолов найдены хлорированные метоксифенолы, что свидетельствовало об активном протекании в озере процессов трансформации ХОС [Field, Sierra-Alvarez, 2007].

При изучении компонентного состава ХФС в почвах выявлено присутствие как хлорированных фенолов, так и их производных.

В почвах водосборной территории оз. Банного ХФС составляли 0,146 мкг/г. В компонентном составе основная доля (70 %) приходилась на трихлорфенолы. Производные ХФ в общем содержании не превышали 1,3 %. ПХФ составлял 10 % от общего количества.

В образцах почв на водосборной территории оз. Большие Хрусломены содержание ХФС определено в интервале от 0,022 до 0,058 мкг/г. В их составе доминировали (более 50 %) низкохлорированные соединения, главным образом ди- и трихлорфенолы. Антропогенные тетрахлорфенолы и ПХФ найдены в более высоких концентрациях по сравнению с почвами территории озера Банного. Вклад таких соединений в содержание ХФС составлял от 5 до 38 %, что свидетельствует об антропогенной нагрузке на экосистему озера Большие Хрусломены. ХФС присутствовали как в легко-, так и в трудноэкстрагируемых фракциях.

Производные хлорфенолов не превышали 8 % в общем составе ХФС. Среди производных хлорфенолов в наибольших концентрациях определены хлоркатехолы (хлорированные гидроксифенолы).

Заключение

При исследовании экосистем малых озер, в разной степени изолированных от Белого моря, в донных осадках и почвах водосборных территорий отмечено присутствие ХОС, в том числе стойких органических загрязнителей. Компонентный состав этих соединений представлен высокохлорированными бензолами и хлорфенольными соединениями. Поступление СО₂ в донные осадки и почвы в настоящее время обусловлено преимущественно локальным, региональным и трансграничным атмосферным переносом. Состав ХФС в озерных осадках свидетельствовал о влиянии морских вод на протекание процессов трансформации хлорорганических соединений.

Литература

- Лосюк Г. Н., Краснова Е. Д., Кокрятская Н. М., Воронов Д. А. Основные гидрологические параметры озера Большие Хрусломены (Кандалакшский залив Белого моря) // География: развитие науки и образования: Кол. моногр. по мат-лам Всерос. с междунар. участием науч.-практ. конференции (Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2019 г.). СПб., 2019. С. 334–336.
- AMAP assessment: biological effects of contaminants on Arctic wildlife and fish // Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, Norway, 2018. 96 p.
- Field J. A., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. Science dossier // Euro Chlor. 2007. P. 15–33.
- Gribble G. W. Natural organohalogenes. Science dossier // Euro Chlor. 2004. 60 p.
- Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive review // Naturally Occurring Organohalogen Compounds. 2023. Vol. 121. P. 1–546. doi: 10.1007/978-3-031-26629-4_1
- Lunina O. N., Grouzdev D. S., Patsaeva S. V., Zhiltsova A. A., Suzina N. E., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Veslopolova E. F., Savvichev A. S. Anoxygenic phototrophic bacteria of the meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny (Oleniy Island, Kandalaksha Gulf, Murmansk Oblast, Russia) // Microbiology. 2023. Vol. 92, no. 6. P. 564–580. doi: 10.31857/S0026365623600268
- Pettersen R. Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota (Quality standards for water, sediment and biota) // Miljødirektoratet basert på bakgrunnsdata fra Aquateam. 2016. 13 p.
- Romanenko F. A., Shilova O. S. The postglacial uplift of the Karelian coast of the White Sea according to radiocarbon and diatom analyses of lacustrine-boggy deposits of Kindo Peninsula // Doklady Earth Sciences. 2012. Vol. 442, no. 2. P. 242–246.
- Savvichev A. S., Kallistova A. Y., Rusanov I. I., Pimenov N. V., Kadnikov V. V., Ravin N. V., Voronov D. A., Krasnova E. D. Light-dependent ethane oxidation is the major process of the methane cycle

in the water column of the Bol'shie Khruslomeny polar lake // *Microbiology*. 2019. Vol. 88, no. 3. P. 367–371. doi: 10.1134/S002626171903010X

Savichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Kallistova A. Y., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Sigalevich P. A., Pimenov N. V., Kadnikov V. V., Beletsky A. V., Mardanov A. V., Ravin N. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A. Microbial processes and microbial communities in the water column of the Polar meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea coast // *Front. Microbiol.* 2020. Vol. 11. P. 1945. doi: 10.3389/fmicb.2020.01945

Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). Revised in 2023. Text and Annexes // UNEP Chemicals [Электронный ресурс]. 2024. 83 p. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (дата обращения: 20.09.2024).

Wania F., Mackay D. A global distribution model for persistent organic chemicals // *Sci. Total Environ.* 1995. Vol. 160. P. 211–232. doi: 10.1021/es962399q

Wania F. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region // *Environ. Sci. Technol.* 2003. Vol. 37, no. 7. P. 1344–1351.

References

AMAP assessment: biological effects of contaminants on Arctic wildlife and fish. *Arctic Monitoring and Assessment Programme*. Oslo, Norway; 2018. 96 p.

Field J. A., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. Science dossier. *Euro Chlor*. 2007. P. 15–33.

Gribble G. W. Natural organohalogens. Science dossier. *Euro Chlor*. 2004. 60 p.

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive review. *Naturally Occurring Organohalogen Compounds*. 2023;121:1–546. doi: 10.1007/978-3-031-26629-4_1

Losyuk G. N., Krasnova E. D., Kokryatskaya N. M., Voronov D. A. Main hydrological parameters of Lake Bol'shiye Khruslomeny (Kandalaksha Bay of the White Sea). *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya: Kol. monografiya po materialam Vseros. s mezhdunar. uchastiem nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 18–*

21 aprelya 2019 g.) = Geography: development of science and education: Collective monograph on materials of the annual All-Russian with the int. part., scientific and practical conf. (St. Petersburg, April 18-21, 2019). St. Petersburg; 2019. P. 334–336. (In Russ.)

Lunina O. N., Grouzdev D. S., Patsaeva S. V., Zhiltsova A. A., Suzina N. E., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Veslopolova E. F., Savichev A. S. Anoxygenic phototrophic bacteria of the meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny (Oleniy Island, Kandalaksha Gulf, Murmansk Oblast, Russia). *Microbiology*. 2023;92(6): 564–580. doi: 10.31857/S0026365623600268

Pettersen R. Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota (Quality standards for water, sediment and biota). *Miljødirektoratet basert på bakgrunnsdata fra Aquateam*. 2016. 13 p.

Romanenko F. A., Shilova O. S. The postglacial uplift of the Karelian coast of the White Sea according to radiocarbon and diatom analyses of lacustrine-boggy deposits of Kindo Peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2012;442(2):242–246.

Savichev A. S., Kallistova A. Y., Rusanov I. I., Pimenov N. V., Kadnikov V. V., Ravin N. V., Voronov D. A., Krasnova E. D. Light-dependent ethane oxidation is the major process of the methane cycle in the water column of the Bol'shie Khruslomeny polar lake. *Microbiology*. 2019;88(3):367–371. doi: 10.1134/S002626171903010X

Savichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Kallistova A. Y., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Sigalevich P. A., Pimenov N. V., Kadnikov V. V., Beletsky A. V., Mardanov A. V., Ravin N. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A. Microbial processes and microbial communities in the water column of the Polar meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea coast. *Front. Microbiol.* 2020;11:1945. doi: 10.3389/fmicb.2020.01945

Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). Revised in 2023. Text and Annexes. *UNEP Chemicals*. 2024. 83 p. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (accessed: 20.09.2024).

Wania F., Mackay D. A global distribution model for persistent organic chemicals. *Sci. Total Environ.* 1995;160:211–232. doi: 10.1021/es962399q

Wania F. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region. *Environ. Sci. Technol.* 2003;37(7):1344–1351.

Поступила в редакцию / received: 14.07.2025; принята к публикации / accepted: 12.02.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Колпакова Елена Сергеевна

научный сотрудник

e-mail: kolpelen@yandex.ru

Вельямидова Анна Владиславовна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник

e-mail: allavel@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Kolpakova, Elena

Researcher

Velyamidova, Anna

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

УДК 550.4

ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР ПОЛУОСТРОВОВ РЫБАЧИЙ И СРЕДНИЙ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, АРКТИЧЕСКАЯ ЗОНА РФ)

П. Н. Адамская^{1,2*}, З. И. Слуковский¹, В. А. Даувальтер¹,
И. В. Чикирев²

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН
(Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209),
*polina.adamskaya@bk.ru

² Филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Мурманский арктический университет» в г. Апатиты
(ул. Лесная, 29, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209)

Представлены результаты первого комплексного исследования содержания главных элементов и гранулометрического состава донных отложений шести малых озер (Карху, Питьеовое, Поропеллон, Скорбеевское, Крайнее, Лохи), расположенных на полуостровах Рыбачий и Средний в северной части Мурманской области (Арктическая зона РФ). Результаты показали, что среди главных элементов в осадках преобладает SiO₂ (41,4–59,7 %), и в совокупности с данными о потерях при прокаливании (7,2–35,2 %) это характеризует отложения как органосиликатные. Количество SiO₂ в осадках соответствует его содержанию в породах суши, поступающих в водоем при абразии берегов и выветривании. Процесс механического разрушения пород водосбора и последующего осадконакопления происходил в условиях холодного гумидного климата, что подтверждено результатами расчетов индекса химического выветривания, гидролизатного модуля и титанового модуля. Установлено, что осадки озер Крайнее, Скорбеевское и Лохи имеют связь с глинистыми сланцами, отложения озер Поропеллон и Карху тяготеют по составу к гидрослюдистым пелитам, а в оз. Питьеовое схожи по составу с гидрослюдистыми глинами. Al₂O₃, K₂O и Na₂O в большинстве исследованных озер демонстрируют рост концентраций с глубиной отбора проб, что связано с увеличением доли алевритовой фракции (<0,050–0,005 мм). В целом отложения представлены преимущественно псаммитами (1,00–0,05 мм), указывающими на песчаный тип осадков. Настоящее исследование подчеркивает роль геоморфологических особенностей озер, литологического состава пород водосбора и условий их выветривания в формировании гранулометрического и геохимического состава донных отложений малых озер Арктики.

Ключевые слова: донные отложения озер; геохимические индексы; гранулометрический состав; породообразующие элементы; полуострова Рыбачий и Средний; Арктика

Для цитирования: Адамская П. Н., Слукровский З. И., Даувальтер В. А., Чикирев И. В. Литолого-геохимические особенности современных отложений озер полуостровов Рыбачий и Средний (Мурманская область, Арктическая зона РФ) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 33–48. doi: 10.17076/lim2262

Финансирование. Работа проводилась при поддержке и в рамках реализации проекта РФФ 24-17-20006 «Фоновые озера Арктической зоны Мурманской области: гидрохимия, аномалии тяжелых металлов и микропластик как новый тип загрязнения водоемов мира».

**P. N. Adamskaia^{1,2*}, Z. I. Slukovskii¹, V. A. Dauvalter¹, I. V. Chikirev².
LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF MODERN SEDIMENTS
IN LAKES OF THE RYBACHY AND SREDNY PENINSULAS (MURMANSK
REGION, ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION)**

¹*Institute of the North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences (14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia), *polina.adamskaya@bk.ru*

²*Apatity Branch of the Murmansk Arctic University (29 Lesnaya St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)*

The article presents the results of the first comprehensive study of the content of the main elements and the particle-size composition of sediments in six small lakes (Karhu, Pityevoe, Poropellon, Skorbeevskoe, Krainee, Lohi) located on the Rybachy and Sredny peninsulas in the northern part of the Murmansk Region (Arctic zone of the Russian Federation). The results show that SiO₂ prevails among the main elements in precipitation (41.4–59.7 %). This, together with data on the loss on ignition (7.2–35.2 %), characterizes the deposits as organosiliceous. The amount of SiO₂ in sediments corresponds to its content in land rocks entering the reservoir during coastal abrasion and weathering. The mechanical destruction of rocks of the catchment area and subsequent sedimentation occurred in a cold humid climate, as confirmed by the estimates of the chemical weathering index, the hydrolysate modulus, and the titanium modulus. Sediments of lakes Krainee, Skorbeevskoye and Lohi are shown to be associated with argillaceous shale, the composition of sediments of lakes Poropellon and Karhu aligns with hydrous-mica pelite, and Lake Pityevoe sediments are similar to hydrous-mica clay. The concentrations of Al₂O₃, K₂O, and Na₂O in most of the studied lakes grow with sampling depth, which is due to an increase in the proportion of silt particles (<0.05–0.005 mm). The sediments in general are mainly represented by psammites (1–0.05 mm), pointing to a sandy type of sedimentation. The study highlights the role of the geomorphological features of lakes, lithological composition of rocks in the catchment area, and their weathering conditions in shaping the particle-size and geochemical composition of bottom sediments in small Arctic lakes.

Keywords: bottom sediments of lakes; geochemical indices; particle-size distribution; rock-forming elements; Rybachy and Sredny peninsulas; the Arctic

For citation: Adamskaia P. N., Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Chikirev I. V. Lithological and geochemical features of modern sediments in lakes of the Rybachy and Sredny peninsulas (Murmansk Region, Arctic zone of the Russian Federation). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 33–48. doi: 10.17076/lim2262

Funding. The work was carried out with the support and within the framework of the RSF project #24-17-20006 “Background lakes of the Arctic zone of the Murmansk Region: hydrochemistry, heavy metal anomalies, and microplastics as an emerging pollutant in the world’s waterbodies”.

Введение

Донные отложения являются информационным архивом природных условий формирования озерных экосистем [Dearing, 1991; Эдельштейн, 2014]. Ведущую роль в процессе литогенеза озерных осадков играют геологическое строение и литологический состав пород водосбора, подвергающихся процессам выветривания, эрозии и береговой абразии, которые влияют на поступление терригенного материала в водоем. Интенсивность выветривания и стока напрямую связана с климатическими условиями и гидрологическим режимом. Второстепенное влияние на водоем оказывают биологическая продуктивность и локальные особенности ландшафта [Fralick, Kronberg, 1997; Юдович, Кетрис, 2011]. В этой связи геохимические исследования донных отложений позволяют реконструировать условия осадконакопления и оценить роль различных природных факторов в формировании их химического состава [Иванов, 2006].

Геохимические особенности озерных отложений традиционно изучаются на основе распределения микроэлементов, что связано с их высокой чувствительностью к изменениям условий осадконакопления. При этом роль породообразующих оксидов SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Na_2O , CaO , K_2O , MgO , MnO и их связь с гранулометрическим составом осадков нередко остаются менее изученными [Даувальтер, 2012], несмотря на то, что их анализ позволяет оценить литологические условия водосбора и вклад терригенного материала в состав современных отложений.

На территории Мурманской области насчитывается более 18 тыс. рек и более 105 тыс. озер [Кольская..., 2008; Даувальтер, Кашулин, 2014]. Большинство водоемов региона относятся к малым озерам с площадью зеркала менее 1 км^2 . Кроме того, основная масса озер расположены вне зон прямого антропогенного воздействия. К таким территориям относится северная часть Мурманской области, приуроченная к побережью Баренцева моря, включая полуострова Рыбачий и Средний. Ранее проведенные исследования показали, что в гидрохимическом и геохимическом отношении озера полуостровов Рыбачий и Средний в целом сохраняют фоновые характеристики, а влияние антропогенных факторов проявляется преимущественно за счет дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ [Slukovskii et al., 2024]. Вместе с тем в опубликованных работах основной акцент сделан на анализ редких и редкоземельных элементов

в отложениях озер и оценку антропогенного влияния на водоем. В этой связи актуальным является комплексное исследование геохимии озер полуостровов Рыбачий и Средний с привлечением различных методов для оценки влияния природных факторов на формирование современного облика осадков указанных водоемов.

В целом, несмотря на некоторые опубликованные работы, территория полуостровов Рыбачий и Средний является слабоисследованной с лимнологической точки зрения. При этом уникальные геологические условия региона, отличающиеся от геологических условий основной части Мурманской области [Атлас..., 1971], в совокупности с его рекреационной привлекательностью делают изучение озер и их компонентов на полуостровах Рыбачий и Средний актуальными.

Таким образом, цель работы заключается в том, чтобы оценить содержание главных элементов и органического материала в современных отложениях озер полуостровов Рыбачий и Средний, показать их связь с гранулометрическим составом осадков и основными природными (геологическими) факторами, влияющими на формирование озерных отложений.

Общая геологическая характеристика района исследования

Полуострова Средний и Рыбачий располагаются на северо-западе Мурманской области (рис. 1) и административно входят в состав Печенгского муниципального округа. Рельеф местности характеризуется платообразной структурой, резко обрывающейся к Баренцеву морю. Плато сложено преимущественно песчаниками, глинистыми сланцами, алевролитами и карбонатами. Наивысшая точка п-ова Рыбачий достигает высоты 300 м, в то время как максимальная высота п-ова Средний составляет 334 м. Полуостров Средний соединяет п-ов Рыбачий с материковой частью Кольского п-ова через хребет Мустатунтури [Атлас..., 1971].

Геологическая структура полуостровов Средний и Рыбачий является частью позднепротерозойского Тимано-Варангерского геосинклинального складчато-разрывного пояса, граничащего с Восточно-Европейской платформой. Осадочные отложения рифея на данной территории выделяются как самостоятельный структурный блок, обособленный от Мурманского блока пород архейского возраста сложной геометрией отражающих площадок. Кристаллический фундамент архейского базиса в пределах п-ова Средний погружается

на глубины до 8–12 км, а на территории п-ова Рыбачий – до 16–18 км [Симонов, 2002]. В исследуемом районе выделяются две структурно-формационные зоны: зона перикратонного опускания (п-ов Средний) и зона пассивной окраины (п-ов Рыбачий). Более плотные осадочные комплексы п-ова Рыбачий интерпретируются как аллохтонная пластина, надвинутая на менее плотные отложения п-ова Средний [Сорохтин и др., 2022].

Исследуемые на п-ове Рыбачий озера Скорбеевское, Крайнее и Лохи расположены в пределах скорбеевской свиты баргоутной серии рыбачинского комплекса пород. Мощность скорбеевской свиты достигает 500 м. Отложения представлены однородной ассоциацией терригенных пород флишоидного типа. Литологический состав пород включает преимущественно аркозовые алевро-песчаники, алевролиты и глинистые и сульфидно-углеродистые сланцы. Эти породы характеризуются преобладанием алевропелитовых фракций и выраженной ритмичностью турбидитного типа. В породах свиты широко развиты сульфидные

(до 10 см) и карбонатные (до 50 см) конкреции. В целом ассоциация пород п-ова Рыбачий демонстрирует относительно однородный ряд терригенных осадков — от псефитов до пелитов [Негруца и др., 1993].

Исследуемые на п-ове Средний озера Поропеллон и Карху находятся на поропеллонской свите кильдинской серии пород. В то время как озеро Питьевое принадлежит к куяканской свите волоковой серии пород п-ова Средний. Общая мощность разреза данных серий достигает примерно 2 км. Стратиграфический комплекс кильдинской и волоковой серий преимущественно представлен аркозовыми, олигомиктовыми и кварцевыми псаммитами, а также алевролитами и аргиллитами, что указывает на осадконакопление в условиях слабокислых или нейтральных сред с высокой степенью дифференциации осадочного материала. Роль второстепенных компонентов в породах играют конгломераты и гравелиты, а также в основании куяканской свиты установлено присутствие линз переотложенных фосфоритовых слоев [Сорохтин и др., 2022].

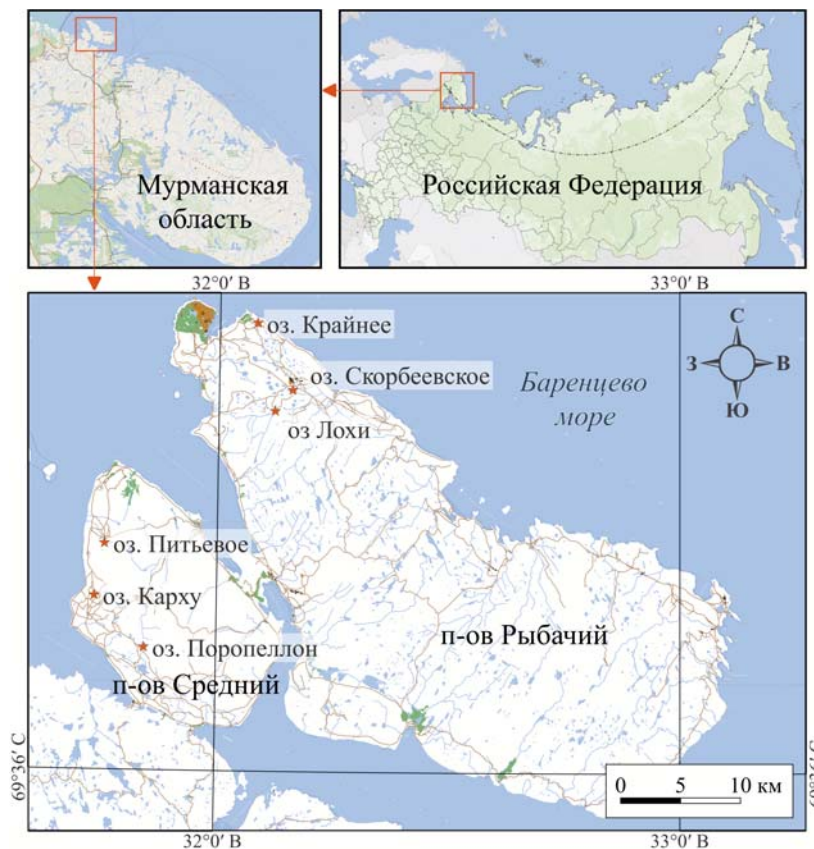


Рис. 1. Картограмма расположения исследованных озер (автор М. А. Шестаков)

Fig. 1. Schematic map of the studied lakes (by M. A. Shestakov)

Все исследуемые водоемы на п-овах Рыбачий и Средний имеют ледниковое происхождение, обусловленное поздневалдайской ледниковой эпохой. Доказательством этого являются вытянутые или треугольные формы озерных котловин, а также присутствие в рельефе местности следов поздне- и послеледниковых трансгрессий [Атлас..., 1971]. Более детально влияние ледника на развитие рельефа на Кольском п-ове освещено в работах [Евзеров и др., 2007; Большианов и др., 2009; Евзеров, 2010].

Материалы и методы

Отбор проб донных отложений проводился в два этапа. В летний период 2020 года с применением пробоотборника системы Стогхейма отобраны стратифицированные пробы отложений с точек максимальных глубин озер Карху и Питьево [Slukovskii et al., 2024]. Во время полевых работ, осуществленных летом 2024 года, также с использованием пробоотборника Стогхейма отобраны донные отложения из наиболее глубоких частей озер Скорбеевское, Крайнее и Поропеллон. С озера Лохи с помощью дночерпателя Экмана-Берджа была получена нестратифицированная проба. Общие географические и морфометрические показатели исследуемых озер отражены в табл. 1.

Мощность полученных колонок донных отложений составляет от 25 до 35 см. После

извлечения колонки были разделены на слои по 5 см, затем каждая проба была помещена в отдельные маркированные грипперы Zip-Lock. Для хранения проб и их транспортировки использовалась сумка-холодильник, что обеспечивало сохранность образцов в течение всего периода работ. Просушивание образцов проб донных отложений до воздушно-сухого состояния проводилось в лабораторных условиях.

Лабораторные исследования осуществлялись на базе Института геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск). Гранулометрический анализ выполнялся с использованием анализатора частиц серии LS13 320 (Beckman Coulter). Навески были усреднены методом квартования. Породообразующие элементы (оксиды Si, Ti, Al, P, Mn, Mg, Fe, K, Na, Ca) в донных отложениях определялись с применением рентгенофлуоресцентного спектрометра марки ARL ADVANT'X (Thermo Fisher Scientific). Пробоподготовка включала в себя плавление образца и литиевого флюса в золото-платиновых тиглях с использованием электроплавильной печи Katanax K1 (SPEX Sample Prep). Погрешность измерения для всех изученных проб в среднем составляет (в %): от 0,6 до 1,19 для SiO_2 , 0,67–1,03 для Al_2O_3 , 0,31–0,51 для суммы окислов Fe, 0,04–0,30 для Na_2O , 0,15–0,23 для CaO, 0,17–0,25 для K_2O , 0,12–0,24 для MgO, 0,06–0,10 для TiO_2 и 0,009–0,06 для P_2O_5 .

Таблица 1. Общие географические и морфометрические показатели озер

Table 1. General geographical and morphometric indicators of the lakes

Название озера Name of the lake	Координаты Coordinates	S, км ² S, km ²	Глубина, м Depth, m		Мощность колонки, см Core length, cm	Полевое описание отложений Field description of sediments
			сред. med.	макс. max.		
Карху Karkhu	69.730280°, 31.736048°	0,06	1,8	2,8	25	мягкий ил от зеленовато-коричневого до светло-коричневого цвета soft mud ranging from greenish-brown to light brown in color
Питьево Pitevoe	69.769419°, 31.756518°	0,09	2,3	3,7	30	мягкий ил буро-коричневого цвета с бактериальным матом в верхней части разреза soft brown mud with a bacterial mat in the upper part of the section
Поропеллон Poropellon	69.692267°, 31.843637°	0,12	0,66	0,8	30	отложения творожистой консистенции темно-серого цвета с растительными остатками dark gray, curd-like (gelatinous) sediments with plant remains
Скорбеевское Skorbееvskoe	69.885323°, 32.159350°	0,17	3,31	8,9	35	мягкий ил светло-коричневого цвета с большим количеством неразложившейся органики light brown soft mud with abundant undecomposed organic matter
Крайнее Krainee	69.934964°, 32.084000°	0,05	2,01	3,2	25	мягкий ил светло-коричневого цвета light brown soft mud
Лохи Lokhi	69.869485°, 32.121749°	0,18	3,06	13,1	—	алеврито-песчанистые отложения бурого цвета с небольшими Fe-конкрециями brown silty-sandy sediments with small Fe concretions

Определение потерь при прокаливании (ППП) проводилось весовым методом после нагревания исследуемых образцов в муфельной печи до температуры 500 °С. Более подробная методика подготовки проб и описание методов лабораторных исследований представлены в работе Т. С. Шелеховой и др. [2020]. Для графического представления данных использовались программы MS Excel 2016, Inkscape 0.91, Matplotlib и QGIS.

Для классификации донных отложений по гранулометрическому составу использовалась классификация, предложенная Д. А. Субетто [2009], основанная на процентном соотношении размерных фракций. Следует отметить, что данная классификация применяется независимо от вещественного состава осадка и не учитывает органическую и/или минеральную составляющую. В связи с этим полученные типы отложений интерпретировались исключительно в гранулометрическом смысле, тогда как особенности вещественного состава осадков учитывались отдельно при обсуждении результатов и сопоставлении с геохимическими данными.

Для расчета геохимических индексов по содержанию порообразующих элементов применялись: индекс химического выветривания (CIA) $(Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO + K_2O)) * 100$; титановый модуль (ТМ) TiO_2 / Al_2O_3 ; гидролизатный модуль (ГМ) $(TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_{общ.} + MnO) / SiO_2$; железный модуль (ЖМ) $(Fe_{общ.} + MnO) / (TiO_2 / Al_2O_3)$; калиевый модуль (КМ) K_2O / Al_2O_3 . Точное использование и интерпретация данных показателей подробно описаны в работах Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис [2011], Е. В. Склярова [2001].

Для выявления взаимосвязей между геохимическими индексами и определения сходства донных отложений с геологическими комплексами использовалась многомерная статистика с применением метода Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP). Это современный алгоритм нелинейного снижения размерности, сохраняющий локальные топологические отношения между объектами многомерного пространства [McInnes et al., 2018]. Для оценки степени «тяготения» озерных осадков к конкретным породам внутри свит использовалось евклидово расстояние между точками озер и точками пород в UMAP-пространстве, что позволяет количественно определить ближайшие литотипы [Legendre, Legendre, 2012]. Анализ проводился в среде программирования Python 3.10 в среде Google Colab с использованием следующих библиотек: pandas – для обработки и структурирования данных; umap-learn – для расчета двумерных проекций.

Результаты и обсуждение

Процессы эрозии материнских пород водосбора приводят к транспортировке силикатных минералов поверхностными водами в водоемы и их последующей аккумуляции в донных отложениях [Страховенко, 2011]. В результате Si и Al концентрируются в осадках и занимают ведущие позиции в их составе [Даувальтер, 2012]. Основную долю состава отложений исследуемых водных объектов занимает SiO_2 , варьируя от 41,8 до 59,5 % в осадках озер на п-ове Рыбачий и от 55,2 до 60,3 % – на п-ове Средний. В осадках оз. Лохи наблюдается повышенное, по сравнению с другими исследуемыми объектами, содержание Al_2O_3 (до 14,2 %). Высокое содержание глинозема может говорить о высоком содержании тонкодисперсных частиц и глинистых минералов [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989], что подтверждается гранулометрическим анализом (табл. 2). Содержание P_2O_5 , достигающее 0,6 % (рис. 2), может свидетельствовать о вымывании фосфатоносных осадочных пород [Негруца и др., 1993]. Низкое значение ППП (7,2 %) свидетельствует о преобладании минеральной составляющей в донных отложениях оз. Лохи, что позволяет отнести их к минеральному типу. Напротив, осадки озер Крайнее, Скорбеевское, Питьево, Поропеллон и Карху классифицируются как органо-силикатные (сапропели), где ППП составляет от 24,2 до 35,2 %, а SiO_2 – от 41,4 до 59,7 % (рис. 3), что отражает существенный вклад в осадкообразование органического материала [Слуковский и др., 2017; Шелехова и др., 2020].

В донных отложениях озер Скорбеевское, Крайнее, Карху и Питьево отмечается тенденция к увеличению содержания Al_2O_3 , K_2O и Na_2O (рис. 4) с глубиной отбора проб, что согласуется с ростом доли алевритовой фракции (0,05–0,005 мм). Подобная закономерность свойственна озерным осадкам и отражает усиление вклада глинистых минералов в более древних горизонтах разреза, а также процессы постседиментационной сортировки и раннего диагенеза осадка [Dean, 1999; Cohen, 2003].

В оз. Поропеллон выявлена обратная тенденция, что может свидетельствовать о накоплении органического вещества в нижних горизонтах разреза, сформированных в условиях более низкой гидродинамической активности и ограниченного поступления терригенного материала. Подобные профили ППП характерны для малых озер с устойчивыми условиями седиментации и слабой минерализацией притока [Meyers, 2003].

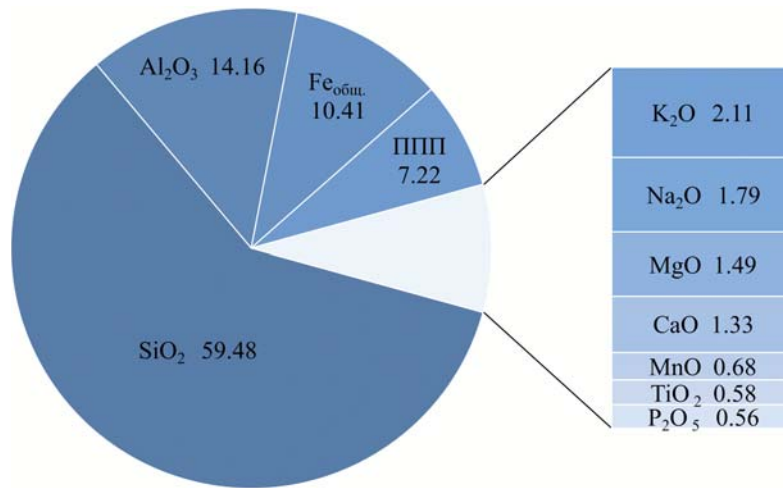


Рис. 2. Состав породообразующих (главных) элементов в осадках оз. Лохи, %

Fig. 2. Composition of the rock-forming (main) elements in the sediments of Lake Lokhi, %

В оз. Питьево отмечается локальный максимум ППП на глубине 15–20 см, что указывает на кратковременное изменение условий осадконакопления. Данный уровень, вероятно, отражает фазу повышенной биопродуктивности или

усиленного поступления органического вещества, что могло быть связано с локальными изменениями гидрологического режима озера. Аналогичные пики ППП в разрезах озерных отложений интерпретируются как маркеры кратковременных изменений трофического состояния и редокс-условий среды [Meyers, Ishiwatari, 1993; Dean, 1999]. Таким образом, вариации ППП и содержания главных оксидов по разрезам отражают сочетание дисперсного состояния осадка, изменений источников осадочного материала и динамики органического вещества, что подчеркивает сложный характер формирования донных отложений в малых озерах арктической зоны.

Геохимические вариации состава главных элементов образуют основу для интерпретации гранулометрических данных, являющихся важным индикатором генезиса, физических и химических свойств, а также геохимических и минеральных особенностей донных отложений [Håkanson, Jansson, 1983]. Анализ гранулометрических показателей (табл. 2) свидетельствует о значительном разнообразии гранулометрического состава озерных осадков на полуостровах Средний и Рыбачий. Доминирование песчаных фракций (0,25–0,5 и 0,1–0,25 мм) в большинстве изученных озер позволяет классифицировать отложения как преимущественно песчаные. В соответствии с классификацией смешанных пород Д. А. Субетто [2009] отложения озер Скорбеевское и Питьево можно отнести к алевритовым пескам, поскольку содержание псаммитовых частиц в этих пробах составляет примерно 63–64 %, а алевритовых – 32–35 %.

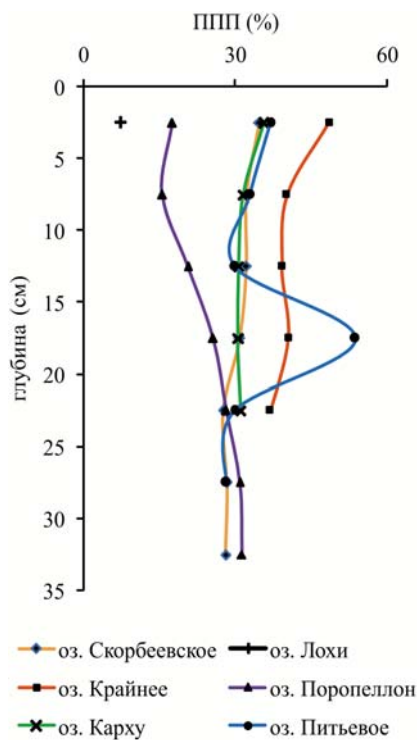


Рис. 3. Распределение количества ППП в донных отложениях озер, %

Fig. 3. Distribution of LOI content in the sediments of the lakes, %

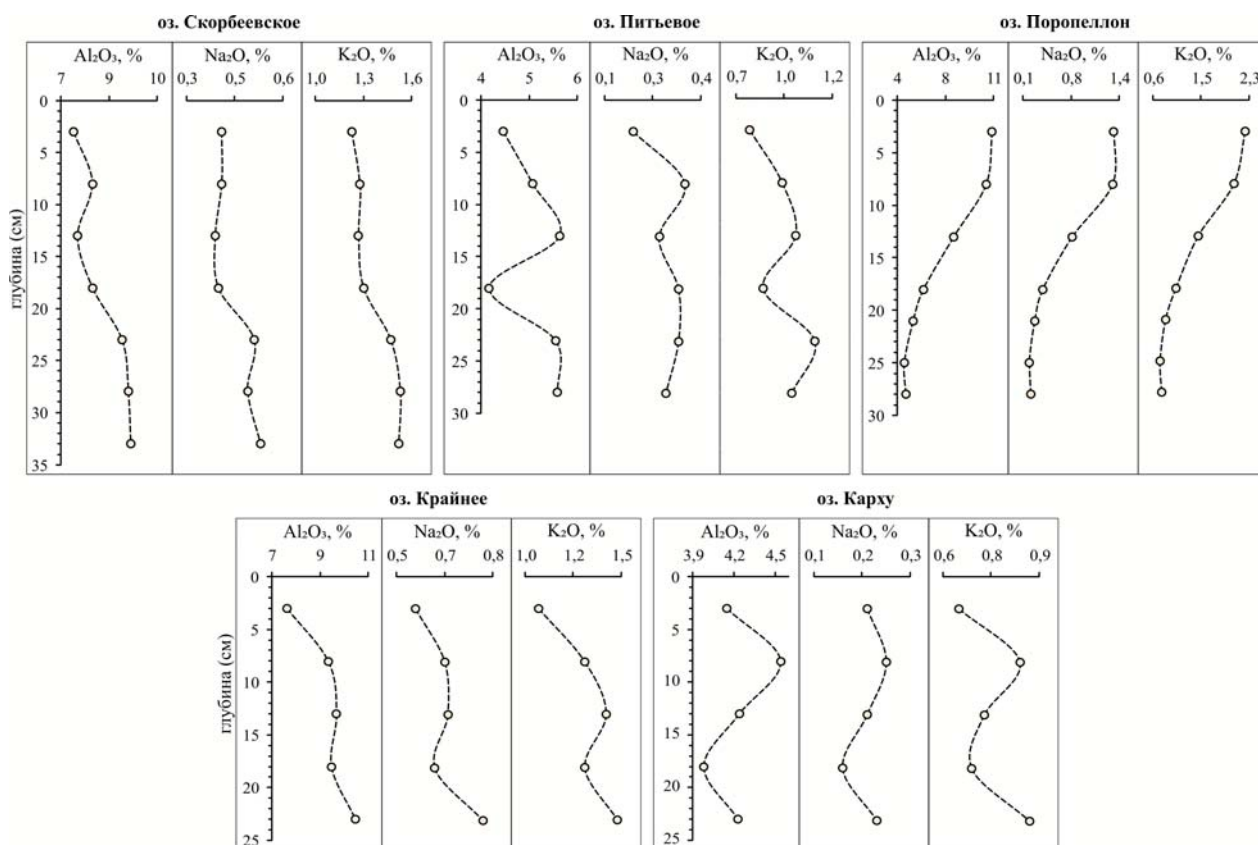


Рис. 4. Распределение содержания Al_2O_3 , K_2O и Na_2O в стратифицированных колонках донных отложений, %
 Fig. 4. Distribution of Al_2O_3 , K_2O and Na_2O in stratified sediment columns, %

В то же время осадки озер Крайнее, Поропеллон и Карху характеризуются высоким содержанием фракций размером от 2,00 до 0,05 мм, суммарная доля которых превышает 70 % общего объема материала, что свидетельствует о принадлежности к «чистым» пескам.

В отложениях оз. Лохи отмечается значительное преобладание алевритовых частиц (до 79 %) в диапазоне от 0,05 до 0,005 мм. Особенности гранулометрического состава отложений оз. Лохи, по сравнению с другими исследуемыми водоемами, вероятно, связаны с геоморфологическими характеристиками его котловины, включая сравнительно большую глубину и высокие крутые берега, что создает условия для интенсивного осаждения тонких частиц вблизи зоны аккумуляции.

Преобладание алевритовой фракции согласуется с геохимическими особенностями осадков. В горизонтах, обогащенных тонкодисперсным материалом, отмечается повышенное содержание Al_2O_3 (рис. 5). Относительно более низкие значения ППП, отмеченные для осадков оз. Лохи по сравнению с другими исследуемыми объектами (рис. 3), могут быть интерпрети-

рованы как результат разбавления органического вещества минеральной составляющей при интенсивном поступлении тонкого терригенного материала [Dean, 1999; Cohen, 2003].

Особенности химического состава донных отложений исследованных озер во многом определяются спецификой процессов береговой абразии, выветривания и переноса терригенного материала пород водосбора. Глинистые сланцы, гидрослюдистые пелиты и хлорит-серицитовые породы характеризуются высокой слоистостью и низкой прочностью, что способствует их интенсивному выветриванию в условиях холодного гумидного климата и формированию тонкодисперсного обломочного материала [Чикирев, Войтеховский, 2017]. В условиях северных регионов разрушение данных пород сопровождается преимущественно механическим распадом с сохранением первичных алюмосиликатных минералов, прежде всего хлорита, серицита и гидрослюды [Иванов, 2006; Даувальтер, 2012]. Транспортировка обломочного материала с водосборов озер полуостровов Рыбачий и Средний осуществляется главным образом за счет склонового

Таблица 2. Средний гранулометрический состав современных отложений в исследуемых озерах, %
 Table 2. Average granulometric composition of the surface sediments in the studied lakes, %

Название озера Name of the lake	Размер фракций, мм / Grain size, mm										Тип, наименование осадка [Субетто, 2009] Sediment type, name [Subetto, 2009]
	Псефиты Psephites	Псаммиты Psammites				Алевриты Aleurites (silt)		Пелиты Pelites	Σпсам Σpsam	Σал Σal	
	> 1 мм	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	<0,005	1–0,05	0,05–0,005	
Скорбеевское Skorbeevskoe	3	2	5	32	25	27	5	0,5	64	32	Песчаный, алевритовый песок Sandy, silty sand
Лохи Lokhi	–	–	–	8	11	50	29	1,4	19	79	Алевритовый, алеврит Silty, silt
Крайнее Krainee	–	2	12	39	18	24	4	0,4	71	28	Песчаный, песок Sandy, sand
Поропеллон Poropellon	1	3	12	36	19	23	5	0,5	70	28	«
Карху Karkhu	0,6	5	15	36	21	20	2	0,3	77	22	«
Питьевое Pitevoe	1	2	7	30	24	31	4	0,5	63	35	Песчаный, алевритовый песок Sandy, silty sand

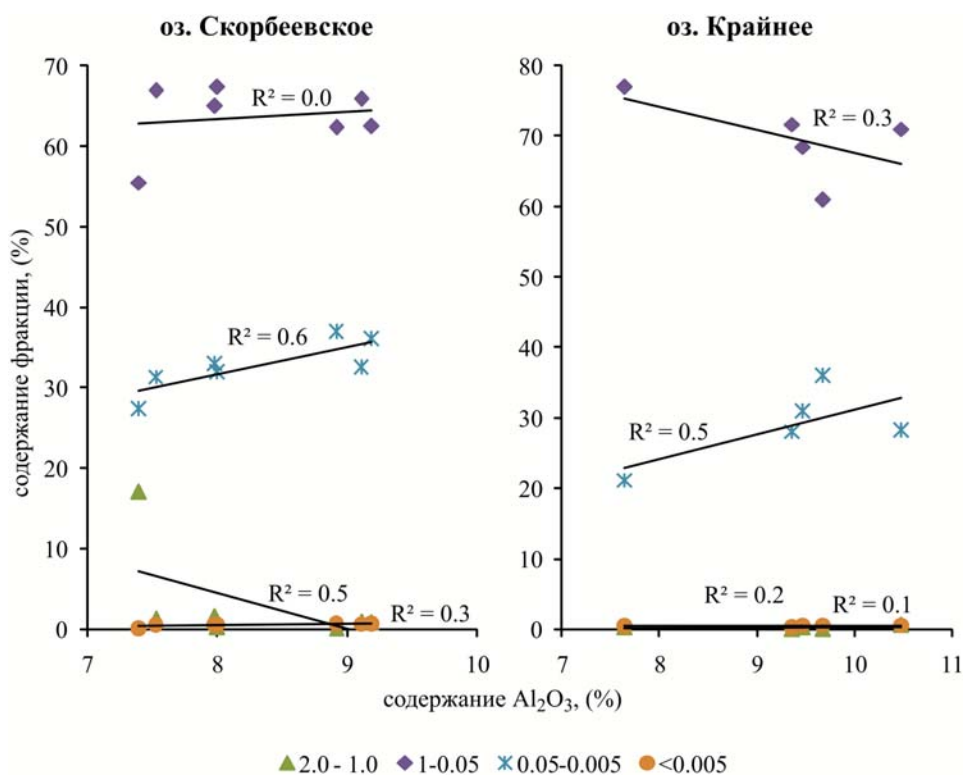


Рис. 5. Зависимость содержания Al_2O_3 от размера фракции в донных отложениях на примере озер Скорбеевское и Крайнее

Fig. 5. Dependence of Al_2O_3 content on the fraction size in sediments by the example of Lakes Skorbeevskoe and Krainee

смыва и временных водотоков, активизирующихся в периоды снеготаяния и интенсивных осадков. При этом короткие пути переноса и низкая скорость потоков способствуют слабой дифференциации материала и сохранению его геохимической специфики, что должно свидетельствовать о генетической близости донных отложений и пород водосборной площади [Юдович, Кетрис, 2011; Даувальтер, 2012].

Для комплексного понимания генезиса донных отложений был проведен расчет геохимических индексов (CIA, ТМ, ГМ, КМ, ЖМ) для донных отложений озер полуостровов Рыбачий

и Средний (рис. 6), а также литотипов пород скорбеевской, поропеллонской и куяканской свит, пород рыбачинского комплекса и гранитоидов основания кильдинской серии по данным Сорохтина с соавт. [2022] (табл. 3).

Значения индекса CIA > 70 у всех изученных водоемов указывают на формирование осадков в условиях холодного гумидного климата с устойчивыми процессами химического выветривания и постепенным повышением температур воздуха, что обосновывается увеличением соотношения алюминия и щелочных элементов в продуктах выветривания [Скляров и др., 2001].

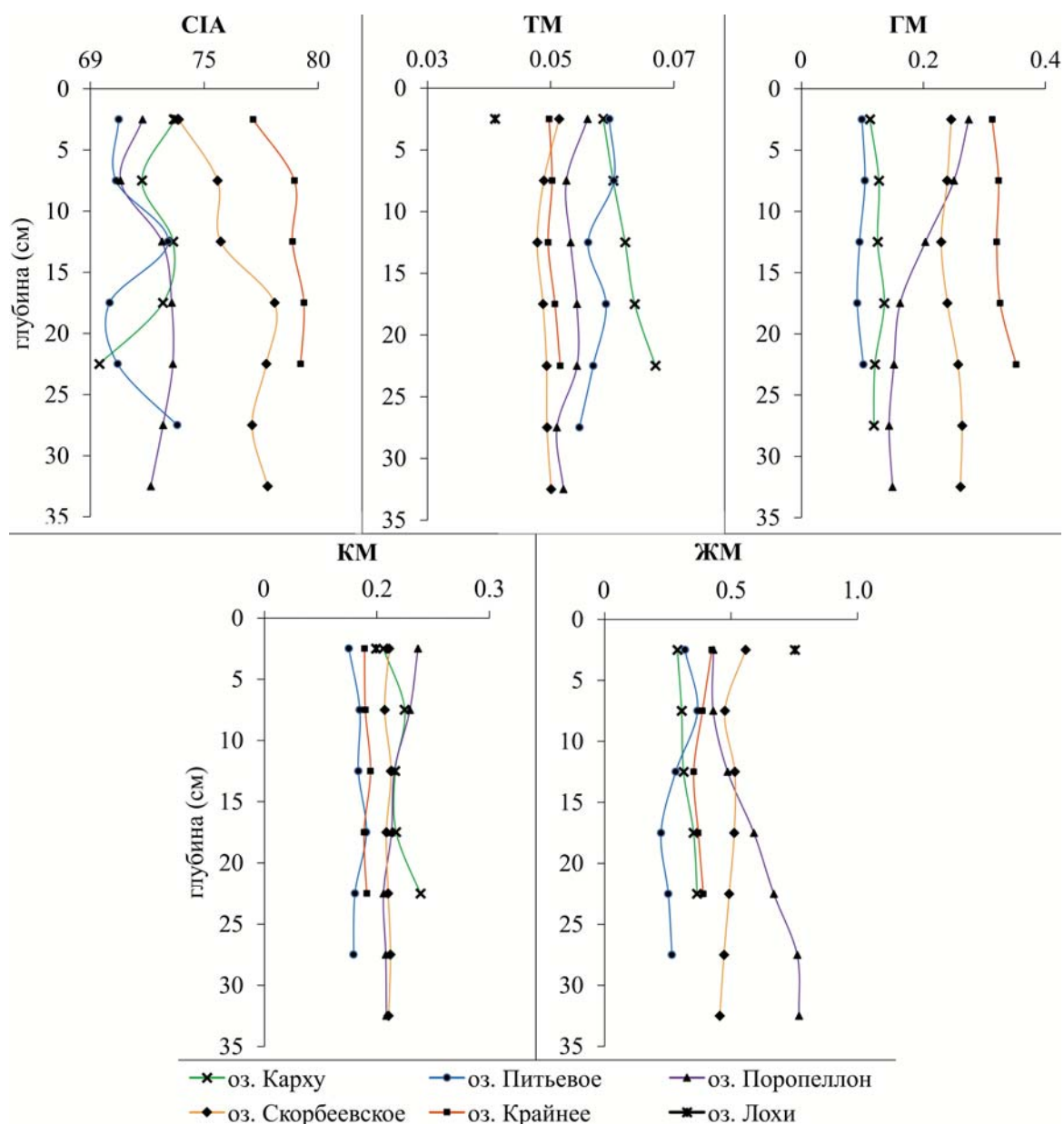


Рис. 6. Значения геохимических модулей в отложениях озер полуостровов Средний и Рыбачий
 Fig. 6. Values of geochemical modules in the sediments of the lakes of the Sredny and Rybачy Peninsulas

Таблица 3. Результаты расчета геохимических индексов в литотипах пород полуостровов Рыбачий и Средний
 Table 3. Results of calculation of geochemical indices in lithotypes of rocks of the Rybachy and Sredny Peninsulas

Литотипы пород Rock lithotypes	Геохимические индексы Geochemical indices				
	CIA	TM	ГМ HM	КМ PM	ЖМ IM
Литотипы пород скорбеевской свиты Lithotypes of the Skorbeevskaya Formation					
граувакковые (субграувакковые) песчаники graywacke (subgraywacke) sandstones	61,99	0,02	0,23	0,09	0,24
алевролиты siltstones	64,88	0,05	0,39	0,21	0,48
глинистые сланцы clay shales	73,18	0,04	0,45	0,18	0,48
сульфидно-углеродистые сланцы sulfide-carbonaceous shales	61,09	0,05	0,61	0,18	1,35
сульфидные конкреции sulfide concretions	58,64	0,06	1,25	0,18	8,59
кальцитовые конкреции calcite concretions	7,57	0,06	0,43	0,17	0,70
Литотипы пород поропеллонской свиты Lithotypes of the Poropellonskaya Formation					
аркозовые псаммиты arkosic psammites	69,81	0,09	0,13	0,16	0,52
алевролиты siltstones	68,28	0,07	0,33	0,35	0,55
пелиты pelites	77,45	0,06	0,39	0,19	0,43
Литотипы пород куйаканской свиты Lithotypes of the Kuyakanskaya Formation					
аркозовые псаммиты с глинистым цементом arkosic psammites with clay cement	61,78	0,07	0,14	0,42	0,60
алевролиты с глинистым цементом siltstones with clay cement	68,76	0,07	0,29	0,30	0,46
пелиты pelites	71,06	0,06	0,34	0,26	0,34
фосфатноносные псефиты phosphatic psephites	30,53	0,06	0,11	0,42	0,82
фосфоритовые конкреции phosphorite concretions	15,18	0,06	0,45	0,28	0,59
Литотипы пород рыбачинского комплекса Lithotypes of the Rybachy Complex					
псефиты psephites	60,30	0,03	0,24	0,19	0,43
псаммиты psammites	60,67	0,03	0,23	0,15	0,31
карбонатсодержащие псаммиты и алевролиты carbonate-bearing psammites and siltstones	42,29	0,03	0,28	0,18	0,31
алевролиты siltstones	66,40	0,05	0,45	0,20	0,44
пелиты pelites	64,35	0,05	0,46	0,21	0,40
Гранитоиды основания кильдинской серии Granitoids of the basement of the Kildin Series					
неизмененные граниты unaltered granites	63,69	0,00	0,22	0,14	0,11
измененные граниты altered granites	62,29	0,00	0,20	0,16	0,12
перекрывающие осадочные породы overlying sedimentary rocks	62,93	0,02	0,07	0,49	0,90

Геохронологические данные, полученные в результате исследования А. Н. Толстобровой с соавт. [2024], проведенного в озере в районе хребта Мустатунтури, подтверждают постепенное потепление, что проявляется в увеличении видового разнообразия диатомовых водорослей вверх по разрезу начиная с границы на глубине 90 см (6800 ± 120 лет – наши дни). ТМ в диапазоне 0,05–0,06 также соответствует гумидному типу выветривания [Юдович, Кетрис, 2011], что согласуется с результатами по CIA. Показатели ГМ $\leq 0,43$ указывают на умеренную степень минеральной зрелости материала [Скляров и др., 2001]. Значения КМ 0,13–0,21 указывают на преобладание гидрослюд и хлоритов среди породообразующих минералов [Скляров и др., 2001]. По ЖМ большинство озерных осадков относится к нормально-железистым (0,20–0,60) [Юдович, Кетрис, 2001], тогда как в озерах Лохи и Поропеллон наблюдается повышенное содержание железа (до 0,77).

Результаты многомерного анализа UMAP показали (рис. 7, 8), что точки, соответствующие донным отложениям озер, группируются

вблизи полей определенных литотипов породных комплексов. Такое распределение отражает литогенную обусловленность химического состава осадков и позволяет проследить связь между современными донными отложениями и породами водосбора соответствующих свит. Использование UMAP в геологических исследованиях подтверждено в ряде публикаций, где метод применялся для выявления геохимических и минералогических паттернов в осадочных и магматических породах [McInnes et al., 2018; Becht et al., 2019].

В условиях слабо развитого химического выветривания, характерного для северных регионов, разрушение данных пород сопровождается преимущественно механическим распадом с сохранением первичных алюмосиликатных минералов, прежде всего гидрослюд, хлорита и серицита. Эти минералы отличаются высокой устойчивостью к выщелачиванию щелочных и щелочноземельных элементов и легко вовлекаются в миграцию в составе взвешенного и придонного материала, что обуславливает их накопление в донных отложениях озер [Иванов, 2006].

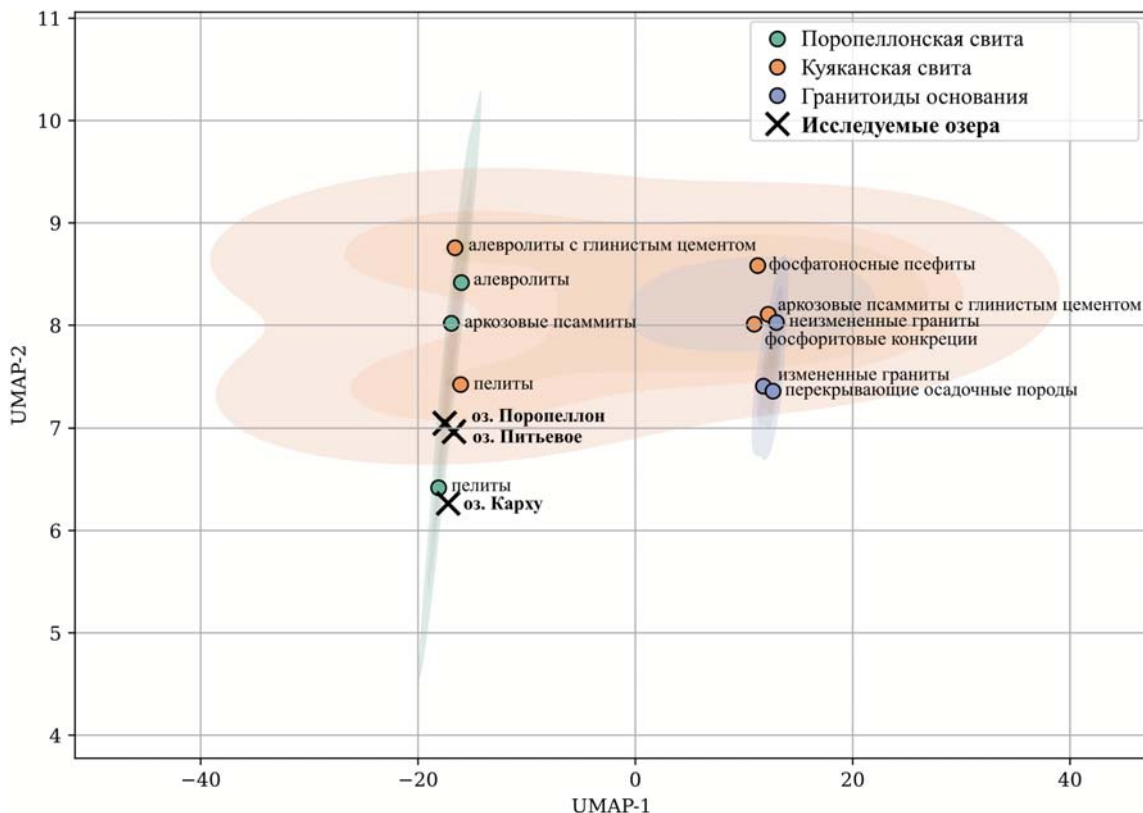


Рис. 7. UMAP-анализ геохимических индексов донных отложений и литотипов пород полуострова Средний

Fig. 7. UMAP-analysis of geochemical indices of the bottom sediments and lithotypes of rocks of the Sredny Peninsula

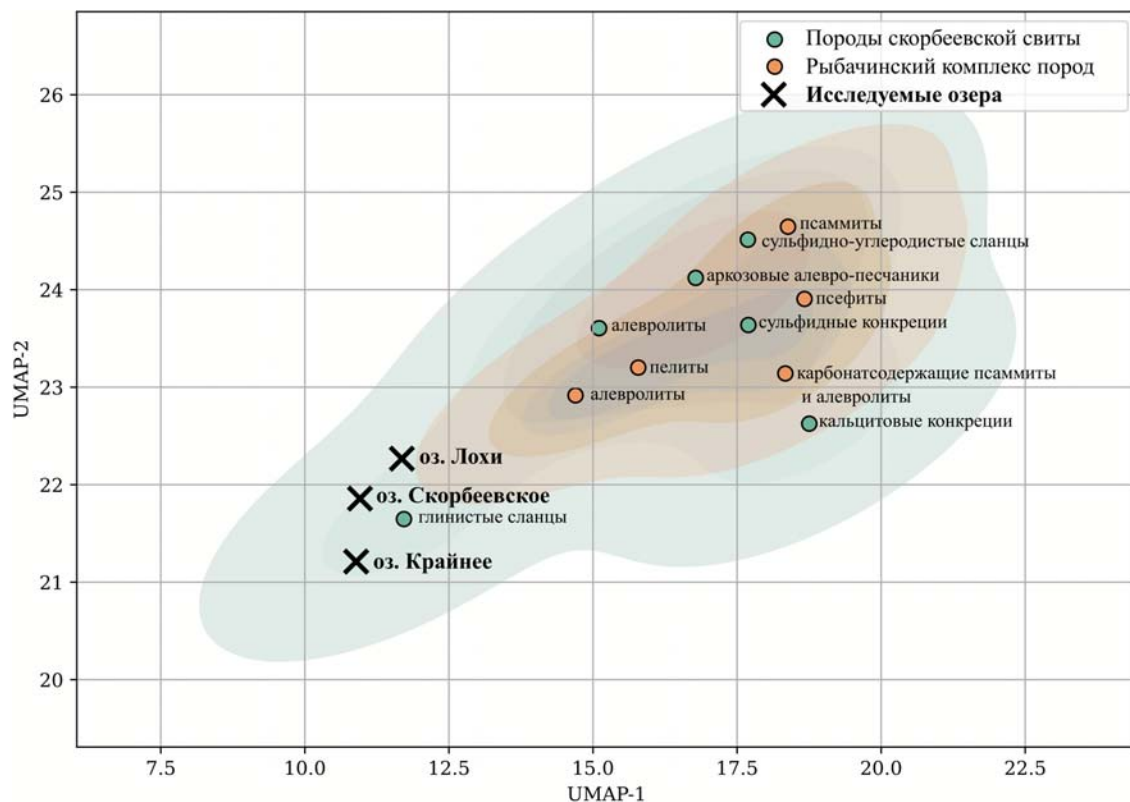


Рис. 8. UMAP-анализ геохимических индексов донных отложений и литотипов пород полуострова Рыбачий

Fig. 8. UMAP-analysis of geochemical indices of the bottom sediments and lithotypes of rocks of the Rybachy Peninsula

Осадки оз. Карху отчетливо тяготеют к пелитам поропеллонской свиты, представленным хлорит-серицитовыми сланцами с высоким содержанием кварц-полевошпатовых примесей. Отложения оз. Поропеллон занимают промежуточное положение между пелитами и аркозовыми псаммитами поропеллонской свиты. Такое положение обусловлено ярко выраженной ритмичностью флишоидного типа в разрезе свиты. При градационной слоистости озерные осадки способны унаследовать комбинированный геохимический облик. Донные отложения оз. Питьево близки по составу к пелитам куяканской свиты, где на 80–85 % преобладает хлорит-серицитовый агрегат (гидрослюдистые глины), а остальную часть породы занимает алевролит кварц-полевошпатового состава [Негруца и др., 1993]. Близкое расположение точек озер Питьево, Поропеллон и Карху на UMAP-графике отражает схожесть химического и минералогического состава пелитов поропеллонской и куяканской свит, влияющих на состав донных отложений. Осадки озер Скорбеевское, Крайнее и Лохи, принадлежащих к скорбеевской свите, группируются вблизи

поля глинистых сланцев, сложенных мусковит-хлоритовым агрегатом. При этом для оз. Лохи авторы предполагают смещение в сторону железосодержащих пород, что обуславливало бы повышенное содержание Fe (до 10,4 %) в донных отложениях. Подобным параметрам соответствуют пирит-марказитовые минерализации, выявленные в отдельных прослоях глинистых сланцев скорбеевской свиты [Негруца и др., 1993].

Заключение

Содержание главных элементов и особенности гранулометрического состава донных отложений шести малых озер на полуостровах Рыбачий и Средний являются результатом сложного взаимодействия множества процессов, включающих климатические, физические, геологические, биологические и прочие факторы. Выветривание и эрозия материнских пород водосбора регулируют поступление Si и Al в отложения, исходя из чего генезис осадков имеет преимущественно органо-силикатный характер, с преобладанием SiO_2 (41,4–59,7 %)

и вариативным количеством ППП (7,2–35,2 %). Наименьшие относительно других водоемов ППП отмечаются в оз. Лохи, в совокупности с показателями Al_2O_3 (до 14,2 %) и P_2O_5 (до 0,6 %) эти параметры свидетельствуют о преобладании минеральной составляющей в его осадках.

Преобладание псаммитовой фракции (1–0,05 мм) в донных отложениях исследуемых озер определяет общую песчаную по гранулометрическому составу направленность осадконакопления. В озерах Скорбеевское и Питьево отложения характеризуются как алевритовые пески (Σ псам = 63–64 %), в озерах Крайнее, Поропеллон и Карху – как «чистые» пески (Σ псам = 70–77 %). Увеличение доли алевритовой фракции (0,05–0,005 мм) в глубинных горизонтах объясняет вертикальные изменения химического состава: с глубиной увеличивается содержание Al_2O_3 , K_2O и Na_2O . Исключением является оз. Лохи, где алевритовая фракция преобладает (до 79 %), что объясняется глубинно-геоморфологическими условиями водоема.

Современный анализ подтверждает, что разрушение материнских пород и дальнейшее осадконакопление материала в водоемах происходило в условиях гумидного климата ($CIA > 70$) с постепенным увеличением температур. Геохимические индексы указывают на преимущественно нормально-железистый ($JM = 0,20–0,60$) состав донных отложений исследованных озер, а также подчеркивают значительную роль гидрослюдистых минералов и хлорита в формировании их минерально-химического состава ($KM = 0,13–0,21$). Исключением является оз. Лохи ($JM = 0,75$), где вероятно влияние на осадки мусковит-хлоритовой минерализации глинистых сланцев. Сопоставление с породами бассейна водосборной площади указывает на генетическую близость отложений озер п-ова Рыбачий к глинистым сланцам скорбеевской свиты, озер Поропеллон и Карху – к гидрослюдистым пелитам поропеллонской свиты и оз. Питьево – к хлорит-серицитам куканской свиты. Таким образом, выявленные зависимости отражают непрерывность миграции химических элементов между породами водосбора и донными осадками.

Литература

Атлас Мурманской области / Гл. ред. А. Г. Дуров и др. М.: ГУГК при СМ СССР, 1971. 33 с.

Большаинов Д. Ю., Макаров А. С., Морозова Е. А., Павлов М. В., Саватюгин Л. М. Развитие природной среды полярных областей Земли

последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1. С. 108–115.

Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области: монография. В 3 ч. Ч. 3. Донные отложения водоемов. Мурманск: МГТУ, 2014. 214 с.

Евзеров В. Я. Реконструкция поверхности поздневалдайского ледникового покрова в области Хибинских и Ловозерских гор на Кольском полуострове // ДАН. 2010. № 430(2). С. 254–256.

Евзеров В. Я., Меллер Я. Й., Колька В. В., Корнер Д. Д. История дегляциации полуостровов Рыбачьего и Среднего (Кольский полуостров) в позднем плейстоцене // Известия РАН. Сер. геогр. 2007. № 5. С. 58–63.

Иванов Г. И. Геоэкология Западно-Арктического шельфа России: литолого-экогеохимические аспекты. СПб.: Наука, 2006. 302 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. М. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Кольская энциклопедия. В 5 т. Т. 1. А–Д / Гл. ред. А. А. Киселев. СПб.-Апатиты: ИС, КНЦ РАН, 2008. 600 с.

Негруца В. З., Басалаев А. А., Чикирев И. В. Баренцевоморский фосфоритовый бассейн. Апатиты: КНЦ РАН, 1993. 119 с.

Симонов А. П., Губерман Д. М., Яковлев Ю. Н., Снетко П. П., Берзин Р. Г., Сулейманов А. К., Андрищенко Ю. Н., Заможная Н. Г. Полуостров Рыбачий (Баренцево море): новые данные о тектонике и перспективах нефтегазоносности рифейских отложений прибрежной зоны Кольского полуострова // ДАН. 2002. № 384(6). С. 795–801.

Склярков Е. В., Гладкочуб Д. П., Донская Т. В., Иванов А. В., Летникова Е. Ф., Миронов А. Г., Бараш И. Г., Буланов В. А., Сизых А. И. Интерпретация геохимических данных: учебное пособие. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.

Слуковский З. И., Ильмаст Н. В., Суховская И. В., Борвинская Е. В., Гоголев М. А. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 45–63. doi: 10.17076/lim618

Сорохтин Н. О., Козлов Н. Е., Глазнев В. Н., Куликов Н. В., Чикирев И. В., Мартынов Е. В., Марчук Т. С. Архей и неопротерозой полуостровов Рыбачий и Средний (Балтийский щит): геология, геодинамика, нефтегазоносность и алмазоносность. Апатиты: КНЦ РАН, 2022. 853 с. doi: 10.37614/978.591137.469.3

Страховенко В. Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2011. 307 с.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 343 с.

Толстоброва А. Н. Характеристика условий среды при накоплении донных отложений озера в районе хребта Мустатунтури (Кольский регион) // Limnology

and Freshwater Biology. 2024. No. 4. С. 779–784. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-779

Чикирев И. В., Войтеховский Ю. Л. Россыпная Ti-Zr минерализация в неопротерозойских (верхне-рифейских) породах кильдинской серии и современных пляжевых отложениях п-овов Средний и Рыбачий, Кольский регион // Вестник МГТУ. 2017. № 1(1). С. 140–150. doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-140-150

Шелехова Т. С., Слукровский З. И., Лаврова Н. Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 111 с.

Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ: учебник для вузов. М.: Перо, 2014. 399 с.

Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.

Becht E., McInnes L., Healy J., Dutertre C.-A., Kwok I., Ng L., Ginhoux F., Newell E. Dimensionality reduction for visualizing single-cell data using UMAP // Nat. Biotechnol. 2019. Vol. 37. P. 38–44. doi: 10.1038/nbt.4314

Cohen A. S. Paleolimnology: the history and evolution of lake systems. Oxford: Oxford University Press, 2003. 528 p.

Dean W. E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments // J. Paleolimnol. 1999. Vol. 21. P. 375–393. doi: 10.1023/A:1008066118210

Dearing J. A. Lake sediment records of erosional processes // Hydrobiologia. 1991. Vol. 214. P. 99–106. doi: 10.1007/BF00050938

Fralick P. W., Kronberg B. I. Geochemical discrimination of elastic sedimentary rock sources // Sediment. Geol. 1997. Vol. 113. P. 111–124. doi: 10.1016/S0037-0738(97)00049-3

Håkanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. London: Springer-Verlag, 1983. 309 p.

Legendre P., Legendre L. Numerical ecology. 3rd English edition. Amsterdam: Elsevier, 2012. 419 p.

McInnes L., Healy O., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction. 2018. doi: 10.48550/arXiv.1802.03426

Meyers P. A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions // J. Paleolimnol. 2003. Vol. 29. P. 1–25. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00168-7

Meyers P. A., Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments // Organic Geochemistry. 1993. Vol. 20. P. 867–900. doi: 10.1016/0146-6380(93)90100-P

Slukovskii Z., Guzeva A., Malysheva M., Kudryavtseva L. Pristine tundra lakes in the north of Murmansk Region (Arctic): geochemistry of sediments, pollution assessment and heavy metal forms // Int. J. Environ. Res. 2024. Vol. 18. Art. 57. doi: 10.1007/s41742-024-00612-7

References

Becht E., McInnes L., Healy J., Dutertre C.-A., Kwok I., Ng L., Ginhoux F., Newell E. Dimensionality reduction for visualizing single-cell data using UMAP. Nat. Biotechnol. 2019;37:38–44. doi: 10.1038/nbt.4314

Bol'shiyanov D. Yu., Makarov A. S., Morozova E. A., Pavlov M. V., Savatyugin L. M. Development of the natural environment of the polar regions of the Earth in the last millennium based on lake sediment studies. Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic. 2009;1:108–115. (In Russ.)

Chikirev I. V., Voitekhovskii Yu. L. Placer Ti-Zr mineralization in the Neoproterozoic (Upper Riphean) rocks of the Kilda series and modern beach deposits of the Sredny and Rybachy Peninsulas, Kola region. Vestnik MGTU = Vestnik of MSTU. 2017;1(1):140–150. (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-140-150

Cohen A. S. Paleolimnology: the history and evolution of lake systems. Oxford: Oxford Univ. Press; 2003. 528 p.

Dauval'ter V. A. Geocology of lake bottom sediments. Murmansk: MGTU; 2012. 242 p. (In Russ.)

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Geocology of lakes of the Murmansk Region: a monograph. In 3 parts. Part 3. Bottom sediments of water bodies. Murmansk: MGTU; 2014. 214 p. (In Russ.)

Dean W. E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments. J. Paleolimnol. 1999;21: 375–393. doi: 10.1023/A:1008066118210

Dearing J. A. Lake sediment records of erosional processes. Hydrobiologia. 1991;214:99–106. doi: 10.1007/BF00050938

Durov A. G. et al. (eds.). Atlas of the Murmansk Region. Moscow: GUGK SM SSSR; 1971. 33 p. (In Russ.)

Edelstein K. K. Hydrology of lakes and reservoirs: a university textbook. Moscow: Pero; 2014. 399 p. (In Russ.)

Evzerov V. Ya. Reconstruction of the Late Valdai ice-sheet surface in the area of the Khibiny and Lovozero mountains, Kola Peninsula. Doklady Earth Sciences. 2010;430(2): 254–256. (In Russ.)

Evzerov V. Ya., Möller J. Y., Kol'ka V. V., Corner D. D. Deglaciation history of the Rybachy and Sredny Peninsulas (Kola Peninsula) in the Late Pleistocene. Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series. 2007;5: 58–63. (In Russ.)

Fralick P. W., Kronberg B. I. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources. Sedimentary Geology. 1997;113:111–124. doi: 10.1016/S0037-0738(97)00049-3

Håkanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. London: Springer-Verlag; 1983. 309 p.

Ivanov G. I. Geocology of the Western Arctic shelf of Russia: lithological and ecological-geochemical aspects. St. Petersburg: Nauka; 2006. 302 p. (In Russ.)

Kabata-Pendias A., Pendias H. Micronutrients in soils and plants. Moscow: Mir; 1989. 439 p. (In Russ.)

Kiselev A. A. (ed.). Kola encyclopedia. Vol. 1. St. Petersburg-Apatity: IS, KSC RAS; 2008. 600 p. (In Russ.)

Legendre P., Legendre L. Numerical ecology. 3rd English edition. Amsterdam: Elsevier; 2012. 419 p.

McInnes L., Healy O., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction. 2018. doi: 10.48550/arXiv.1802.03426

Meyers P. A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions. J. Paleolimnol. 2003;29:1–25. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00168-7

Meyers P. A., Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org. Geochem.* 1993;20:867–900. doi: 10.1016/0146-6380(93)90100-P

Negrutsa V. Z., Basalaev A. A., Chikirev I. V. Barents Sea phosphorite basin. Apatity: KSC RAS; 1993. 119 p. (In Russ.)

Shelekhova T. S., Slukovskii Z. I., Lavrova N. B. Methods of studying bottom sediments of lakes of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 111 p. (In Russ.)

Simonov A. P., Guberman D. M., Yakovlev Yu. N., Snetko P. P., Berzin R. G., Suleimanov A. K., Andryushchenko Yu. N., Zamozhnyaya N. G. The Rybachy Peninsula (Barents Sea): new data on tectonics and prospects for oil and gas potential of Riphean sediments in the coastal zone of the Kola Peninsula. *Doklady Earth Sciences.* 2002;384(6):795–801. (In Russ.)

Sklyarov E. V., Gladkochub D. P., Donskaya T. V., Ivanov A. V., Letnikova E. F., Mironov A. G., Barash I. G., Bulanov V. A., Sizykh A. I. Interpretation of geochemical data: a study guide. Moscow: Internet Engineering; 2001. 288 p. (In Russ.)

Slukovskii Z. I., Ilmast N. V., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V., Gogolev M. A. The geochemical specifics of modern sedimentation processes on the bottom of a small Lake Lamba under technogenic impact. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN =*

Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2017;10:45–63. (In Russ.). doi: 10.17076/lim618

Slukovskii Z., Guzeva A., Malysheva M., Kudryavtseva L. Pristine tundra lakes in the north of Murmansk Region (Arctic): geochemistry of sediments, pollution assessment and heavy metal forms. *Int. J. Environ. Res.* 2024;18:57. doi: 10.1007/s41742-024-00612-7

Sorokhtin N. O., Kozlov N. E., Glaznev V. N., Kulikov N. V., Chikirev I. V., Martynov E. V., Marchuk T. S. Archean and Neoproterozoic of the Rybachy and Sredny Peninsulas (Baltic Shield): geology, geodynamics, petroleum potential and diamond potential. Apatity: KSC RAS; 2022. 853 p. (In Russ.). doi: 10.37614/978.591137.469.3

Strakhovenko V. D. Geochemistry of bottom sediments of small continental lakes of Siberia: DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Novosibirsk; 2011. 307 p. (In Russ.)

Subetto D. A. Lake bottom sediments: palaeolimnological reconstructions. St. Petersburg: Herzen Univ. Press; 2009. 343 p. (In Russ.)

Tolstobrova A. N. Environmental conditions of sediment accumulation in a lake near the Mustatunturi Ridge (Kola Region). *Limnology and Freshwater Biology.* 2024;4:779–784. (In Russ.). doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-779

Yudovich Ya. E., Ketris M. P. Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry). Syktyvkar: Geoprint; 2011. 742 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 20.11.2025; принята к публикации / accepted: 26.02.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Адамская Полина Николаевна

инженер ИППЭС КНЦ РАН; студентка МАУ

e-mail: polina.adamskaya@bk.ru

Слуковский Захар Иванович

канд. биол. наук, заведующий лабораторией

e-mail: slukovsky87@gmail.com

Даувальтер Владимир Андреевич

д-р геогр. наук, главный научный сотрудник

e-mail: vladimir.dauvalter@mail.ru

Чикирев Игорь Владимирович

канд. геол.-мин. наук, заведующий кафедрой

e-mail: geo@arctivsu.ru

CONTRIBUTORS:

Adamskaia, Polina

Engineer, INEP KSC RAS; Student, Murmansk Arctic University

Slukovskii, Zakhar

Cand. Sci. (Biol.), Head of Laboratory

Dauvalter, Vladimir

Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher

Chikirev, Igor

Cand. Sci. (Geol.), Head of Department

УДК 556.5 (1-751.1)

ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ В КАРЬЕРНЫХ ВОДОЕМАХ ГОРНОГО ПАРКА РУСКЕАЛА (КАРЕЛИЯ)

Г. С. Бородулина^{1*}, И. В. Токарев², П. В. Медведев³, В. А. Шеков³

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*bor6805@yandex.ru

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
(21-я линия В. О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106)

³ Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

В работе отражены результаты гидрогеохимических исследований на территории Горного парка Рускеала, созданного на месторождении мрамора в Сортавальском районе (Республика Карелия). Приведена изотопно-геохимическая характеристика подземных и поверхностных вод объектов природного (р. Тохмайоки, малые озера) и искусственного происхождения (карьерные водоемы, затопленная штольня). Дан анализ распределения и накопления в воде микроэлементов, радиоактивных и радиогенных элементов. Показано, что водоемы в горных выработках образовались за счет поступления атмосферных осадков и подземных вод, химический состав которых трансформируется в зависимости от размеров выработок, степени их открытости к атмосфере и сезонности. Показана роль углекислого газа в сезонных вариациях химического состава воды в открытых водоемах. Для моделирования процесса взаимодействия воды с породой и установления характера их равновесия и направленности преобразования состава растворов во времени выполнены лабораторные эксперименты по выщелачиванию мрамора водой, рассчитаны индексы насыщения карбонатами опытных и природных растворов. Показано, что подземная вода поступает в карьер практически равновесной с карбонатами. В воде карьеров степень насыщения изменяется в течение года: зимой карбонаты способны растворяться, летом вода перенасыщена карбонатами, образуется взвесь. В отличие от подземных в составе карьерных вод отмечаются повышенные по сравнению с фоном концентрации нитратов, что связано с возрастающей рекреационной нагрузкой на территорию Горного парка.

Ключевые слова: Горный парк Рускеала; месторождение мрамора; карьерные водоемы; поверхностные воды; подземные воды; химический состав воды; водная вытяжка; равновесие с карбонатами; изотопы кислорода и водорода; Республика Карелия

Для цитирования: Бородулина Г. С., Токарев И. В., Медведев П. В., Шеков В. А. Формирование химического состава воды в карьерных водоемах Горного парка

Финансирование. Исследования в 2018–2019 гг. выполнены в рамках международного проекта BSUIN (“Baltic Sea Underground Innovation Network»), продолжены в рамках государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС, ИГ). Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» и в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ.

**G. S. Borodulina^{1*}, I. V. Tokarev², P. V. Medvedev³, V. A. Shekov³.
FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER IN WATER
BODIES OCCUPYING QUARRIES IN THE RUSKEALA MINING PARK
(KARELIA)**

¹*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *bor6805@yandex.ru*

²*St. Petersburg Mining University named after Empress Catherine II (2 Vasilyevsky Island, 21st Line, 199106 St. Petersburg, Russia)*

³*Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia)*

This paper presents the results of hydrogeochemical studies in the Ruskeala Mining Park, created at a marble deposit in the Sortavala District (Karelia). It presents the isotope and geochemical characteristics of groundwater and surface waters in natural (Tohmajoki River, small lakes) and artificial (quarry reservoirs, a flooded adit) water bodies. The distribution and accumulation of trace elements, radioactive and radiogenic elements in water are analyzed. The process of marble quarry transformation into a reservoir is described, the main driver being the influx of atmospheric precipitation and groundwater, the chemical composition of which is altered within the workings depending on their size, degree of open-air exposure, and seasonality. The role of carbon dioxide in the seasonal variations of the water chemical composition in open water bodies is demonstrated. To establish the nature of the water-rock equilibrium and the vector of transformation of the solution's composition over time, laboratory experiments were conducted for marble leaching with water, and the carbonate saturation of experimental and natural solutions was calculated. It has been shown that groundwater enters the quarry at near equilibrium with carbonates. The degree of saturation in quarry water varies across the year: in winter, minerals are soluble, while in summer, the water is oversaturated with carbonates, forming a suspended solid. Unlike groundwater, quarry waters contain elevated nitrate concentrations compared to background levels, which is associated with the growing recreational pressure on the Mining Park premises.

Keywords: Ruskeala Mining Park; marble deposit; quarry reservoirs; surface waters; groundwater; aqueous extract; equilibrium with carbonates; chemical water composition; isotopes of oxygen and hydrogen; Republic of Karelia.

For citation: Borodulina G. S., Tokarev I. V., Medvedev P. V., Shekov V. A. Formation of the chemical composition of water in water bodies occupying quarries in of the Ruskeala Mining Park (Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 49–63. doi: 10.17076/lim2276

Funding. Research in 2018–2019 was conducted within the international BSUIN (Baltic Sea Underground Innovation Network) project and continued under state assignment to the Karelian Research Center RAS (NWPI, IG). The research was conducted using equipment of the KarRC RAS Core Facility and of the X-ray Diffraction Research Methods Resource Center of the St. Petersburg State University's Science Park.

Введение

Горный парк Рускеала создан на месторождении мрамора в Северном Приладожье (Сортавальский район, Республика Карелия) на территории каменоломен, известных с середины 17 века и действовавших до конца 20 века. Добыча мрамора велась в основном на горе Белой в Главном карьере [Дорога..., 2014; Борисов, 2015]. С 1896 г. разработка на участке Рускеала-1 осуществлялась на шести горизонтах, три из которых были подземными. С 1946 г. подземный способ добычи мрамора уже не применялся, Главный карьер больше не эксплуатировался и после его полного осушения в 1947 г. начал заполняться водой [Анищенкова, Кудрев, 1954]. В северной части месторождения в обширной подземной выработке 3-го горизонта при обрушении кровли образовался так называемый Рускеальский провал – отверстие диаметром 20–24 м. Под ним в затопленной выработке (подземное озеро) сформировались грандиозные мраморные залы [Борисов, 2010]. Восстановление уровня воды в Главном карьере происходило со средней скоростью 3,1 м/год. За 6 лет (к 1953 г.) уровень воды с отметки +16 м восстановился на 40,65 м, за следующие 15 лет – еще на 24,15 м до отметки +80,8 м [Смирнова, 1969]. К началу 1970 г. уровень воды в карьерах стабилизировался и соответствует уровню подземных вод.

В 1950–70-х гг. на месторождении были заложены новые карьеры, в которых продолжалась добыча мрамора для производства извести, декоративной крошки, известковой муки, щебня. Разработка мрамора на участке Рускеала-1 закончилась в конце 1980-х годов, а на соседнем участке Рускеала-2 продолжалась до начала 2000-х. Расчет водопритока в карьер Рускеала-2 с отработкой горизонтов ниже уровня реки показал, что для откачки воды из карьера достаточно работы одного насоса мощностью 100 м³/час [Мустонен и др., 1957]. После окончания работ новые карьеры также заполнились водой. Так образовались озера Монферрана и Светлое, водоем в карьере Рускеала-2.

С 2005 г. на территории месторождения начал развиваться парк как исторический, природно-техногенный и ландшафтно-туристский объект. На сегодняшний день Горный парк – памятник историко-культурного (горнопромышленного) наследия Республики Карелия [Борисов, 2015; Шеков, 2021]. Основой парка являются Мраморный каньон – водоем в бывшем Главном карьере месторождения, и затопленная штольня в Рускеальском провале.

Следует отметить, что термин «каньон» (глубокая речная долина) не совсем удачно применен в названии образовавшегося водоема, но используется в работе как устоявшийся топоним.

Исследование процессов преобразования карьеров в водоемы имеет важное значение для региона с развитым горнопромышленным комплексом. После завершения добычи полезных ископаемых наблюдается процесс природного самообновления территории, нарушенной горными выработками. В обводнении горных выработок участвуют подземные воды и атмосферные осадки. При формировании химического состава воды в образовавшихся водоемах в исторический период затопления определяющим фактором является смешивание вод разного состава, в период стабилизации колебания состава воды связаны с метеорологическим фактором [Гайдин, 2012]. Карьеры Рускеалы являются ярким примером формирования водоемов в отработанных карьерах в период стабилизации и представляют собой модель формирования химического состава природных вод в карбонатных породах палеопротерозойского возраста. Цель нашей работы – изучение химического состава воды в карьерах на месторождении мрамора Рускеала и других водных объектов Горного парка для оценки роли подземных вод в формировании состава воды в обводненных горных выработках.

Объекты и методы исследований

В геологическом отношении территория располагается в пределах области сочленения двух крупных структур Фенноскандинавского щита: архейского Карельского кратона и палеопротерозойского Свекофеннского орогена [Геология..., 2000]. Нижний структурный этаж образуют архейские гранито-гнейсы краевой части Карельского кратона, на которые ложатся палеопротерозойские породы верхнего структурного этажа в составе сортавальской и ладожской серий. Сортавальская серия сложена метаморфическим вулканогенно-карбонатным комплексом. Ладожская серия состоит преимущественно из метатерригенных пород. Кристаллические породы перекрыты чехлом четвертичных отложений различного состава и небольшой мощности. Карбонатные метаморфические породы осадочного происхождения в Приладожье характеризуются исключительным разнообразием по минеральному и химическому составу [Соколов, 1963].

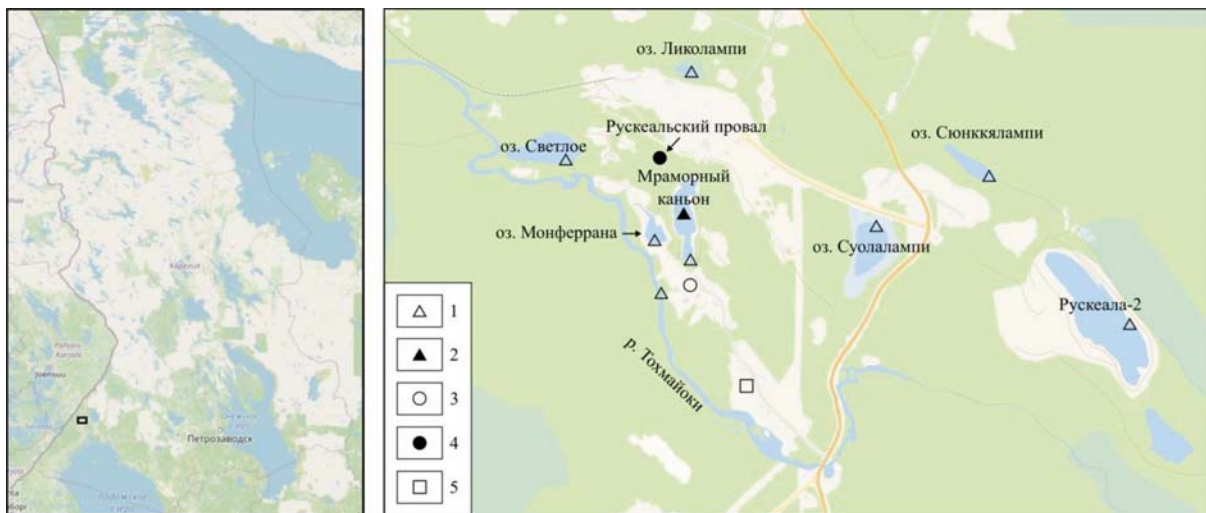


Рис. 1. Схема расположения станций опробования водных объектов на территории Горного парка Рускеала:

1 – поверхностные объекты (карьерные водоемы, озера, река); 2 – станция подледного зондирования в Мраморном каньоне; 3 – скважина; 4 – подземное озеро; 5 – колодец

Fig. 1. Layout of water sampling stations on the Ruskeala Mining Park territory:

1 – surface objects (quarry reservoirs, lakes, the river); 2 – subglacial sounding station in the Marble Canyon; 3 – well; 4 – underground lake; 5 – dug well

Рускеальское месторождение состоит преимущественно из кальцитовых и кальцит-доломитовых мраморов. Фильтрационные свойства трещиноватых карбонатных пород изменчивы и, как правило, низкие: по результатам откачек из восьми скважин на Рускеальском месторождении средний коэффициент фильтрации составил 0,0044 м/сут [Смирнова, 1969; Ресурсы..., 1987]. По данным разведочных работ и результатам бурения водозаборных скважин в п. Рускеала удельный дебит скважин оказался очень низким (0,002–0,012 л/с), поэтому в настоящее время большинство скважин не эксплуатируются. Опыт эксплуатации горных выработок на месторождении Рускеала также свидетельствует об очень низкой водообильности пород и весьма благоприятных гидрогеологических условиях для ведения горных работ. В. П. Соболевский [1839] отмечал, что «...вода мало заливаает работы...» и достаточно естественного стока воды в долину р. Русколки (Тохмайоки).

Подземные воды в районе месторождения приурочены к верхней части карбонатных и кремнисто-карбонатных пород. Из-за наличия перекрывающих глинистых отложений четвертичного чехла в большинстве случаев воды кристаллических пород имеют небольшой напор. Питание подземных вод осуществляется полностью за счет атмосферных осадков. Общее движение подземных вод направлено

в сторону р. Тохмайоки. В настоящее время видимый сток из Главного карьера (Мраморный каньон) с сезонным диапазоном расхода 0,5–2 л/сек наблюдается в штольне, направленной от Рускеальского провала к оз. Монферрана.

Рускеальское месторождение находится на левом берегу р. Тохмайоки, в среднем ее течении (рис. 1). Тойхмайоки – одна из крупных рек Северного Приладожья. В пределах Карелии ее длина составляет 64 км, площадь водосбора – 1602 км², а средний многолетний расход воды – 9,2 м³/с [Каталог..., 2001]. Река протекает по юго-западной границе месторождения, вдоль северной и восточной его границ располагается ряд небольших (площадь менее 0,02 км²) озер. Озера Ликолампи и Суолалампи в период разработки месторождения были соединены между собой водоотводной канавой с последующим стоком в р. Тохмайоки [Сахаров, 1940]. Из оз. Сюнккялампи берет начало ручей, также впадающий в р. Тохмайоки в 2,3 км юго-восточнее своего истока.

Исследования проводились на территории Горного парка Рускеала в 2018–2022 гг. в разные сезоны года. Объектами изучения являлись: карьерные водоемы (Мраморный, Монферрана, Светлое, Рускеала-2), подземное озеро в Рускеальском провале, подземные воды территории, река Тохмайоки в пределах парка и окружающие его малые озера (Ликолампи, Суолалампи, Сюнккялампи) (рис. 1).

Отбор проб воды на химический анализ из открытых водоемов проводился с глубины 0,5 м прямым способом, подземной воды – из водозаборной скважины и колодца – сифонным. На месте отбора фиксировалась температура, измерялись pH, электропроводность воды. Для определения железа пробы воды консервировались 4M H₂SO₄, для микрокомпонентов – концентрированной HNO₃. В течение суток пробы доставлялись в стационарную аналитическую лабораторию гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), где выполнялся химический анализ воды в соответствии с методами [Аналитические..., 2017]. В 2022 г. в водах карьеров определен общий азот (анализатор Shimadzu TOC-L_{CSN}). Микроэлементный состав определен ICP-MS методом (масс-спектрометр Thermo Fisher Scientific) в Центре коллективного пользования Института геологии КарНЦ РАН (калибровка по международным стандартам IV-STOCK-1643). Измерения содержания дейтерия и кислорода-18 выполнены на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L 2120-i в Научном парке Санкт-Петербургского государственного университета. Ошибка измерения составляла ±0,1 ‰ для δ¹⁸O и ±1 ‰ для δ²H. Растворенный гелий определялся на магниторазрядном индикаторе ИНГЕМ-1. Объемная активность Rn-222 анализировалась радиометром PFA-01 и измерительным комплексом «Альфарад плюс». Предел относительной погрешности не более 30 %.

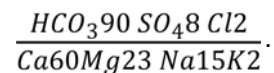
В марте 2019 г. в центре Мраморного каньона со льда выполнено зондирование водной толщи (зонд CastAway-CTD), получен вертикальный профиль температуры и электропроводности слоя воды, взяты пробы на химический состав воды поверхностного и придонного горизонтов водоема.

Для выяснения роли карбонатных пород в формировании химического состава воды, направленности процесса растворения и характера равновесия воды с породой выполнены лабораторные эксперименты по выщелачиванию мрамора (без видимых включений). Раздробленную породу различных фракций (< 1 мм, 1–3 мм и 3–5 мм) заливали дистиллированной водой в весовом соотношении порода-вода 1:5. Выполнялась серия последовательных вытяжек из одной и той же навески мрамора свежими порциями воды с различным временем контакта порода-вода: от 10 минут до 38 суток. Таким образом моделировался процесс многократного поступления воды в один и тот же объем раздробленной породы. Полученные растворы фильтровались и анализировались их химический состав.

С помощью программы PHREEQC, использующей базу термодинамических данных [Parkhurst, Appelo, 1999], рассчитан индекс насыщения SI раствора (Saturation index) к наиболее характерным минеральным фазам в зависимости от величины pH, Eh, температуры и химического состава опытных растворов и природных вод. Индекс насыщения характеризует недосыщенность или пересыщенность раствора по отношению к твердой фазе, т. е. указывает на потенциальную возможность растворения (при SI < 0) или осаждения (при SI > 0) минерала. Нулевое значение индекса говорит о равновесном состоянии раствора с минералом.

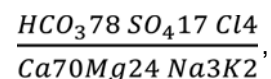
Результаты и обсуждение

Подземные воды Ладожского геоблока в пределах Карелии по данным региональных исследований слабо- и среднеминерализованные (0,1–0,5 г/л), мягкие или умеренной жесткости, преимущественно околонеутральные или слабощелочные, гидрокарбонатные кальциево-магниевые [Ресурсы..., 1987]. Не является исключением подземная вода в районе Горного парка: минерализация воды в скважине составила 0,38 г/л (электропроводность 425 мкСм/см), pH 7,7, формула ионного состава воды имеет вид



В воде колодца электропроводность колеблется по сезонам от 435 до 488 мкСм/см, pH 7,3–7,5 (табл. 1). Среди подземных вод Северного Приладожья вода в скважине Горного парка выделяется самым высоким относительным содержанием гидрокарбонатов (рис. 2).

Минерализация поверхностного слоя воды в подземном озере и оз. Монферрана за период наблюдений 2018–2022 гг. в среднем составила 0,3 г/л, в Мраморном каньоне – 0,27 г/л. Сезонные колебания минерализации воды также невелики: минимальны в подземном озере и максимальны в Мраморном каньоне: от 0,24 г/л летом до 0,3 г/л в зимнюю межень. Вода всех выработок по химическому составу одинакова и отличается от подземной несколько более высоким содержанием сульфатов:



которые образуются в кислородной обстановке за счет окисления сульфидов, характерных для палеопротерозойских вулканогенно-осадочных пород [Кузнецов и др., 2021] (табл. 1, рис. 2).

Вертикальный профиль температуры и электропроводности воды в Мраморном каньоне отражает стратифицированную структуру слоя воды в зимний период: увеличение температуры до 5 °С и электропроводности до 405 мкСм/см у дна водоема (рис. 3).

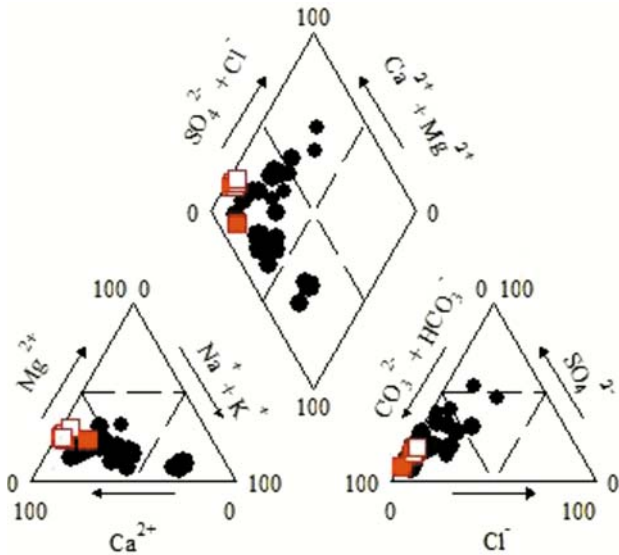


Рис. 2. Химический состав подземных вод Северного Приладожья:

красный квадрат – подземная вода из скважины Горного парка, незалитые квадраты – карьерные воды, черные значки – подземные воды района

Fig. 2. Chemical composition of groundwater in Northern Priladozhye:

red square – groundwater from the Mining Park well, unfilled squares – quarry water, black signs – groundwater in the region

В карьерах сезонные колебания состава воды определяются метеорологическими условиями (осадки, температура) и в большей степени характерны для углекислого газа и гидрокарбонат-иона, определяющих величину pH (рис. 4). Поступающая в карьеры подземная вода содержит CO_2 в количестве 15 мг/л, практически такая же концентрация (14,6 мг/л) сохраняется зимой в придонном слое Мраморного каньона, уменьшаясь к поверхности до 6,2 мг/л, что обеспечивает увеличение pH соответственно от 7,5 до 7,8. Летом в поверхностном слое открытых водоемов CO_2 практически отсутствует, так как вода прогревается до 17–20 °С и растворимость CO_2 понижается. Кроме того, углекислый газ расходуется на биохимические процессы. В результате величина pH в поверхностном слое открытых водоемов летом возрастает до 8,3–8,6, в анионном составе появляется ион CO_3^{2-} , а концентрация HCO_3^- и электропроводность понижаются (рис. 4).

В отличие от карьеров с большой площадью открытого водного зеркала (Мраморный каньон, оз. Монферрана) в подземном озере (провал), значительно меньшем по размерам и практически закрытом от дневного света, ледовый покров сохраняется до июня и даже летом температура воды не поднимается выше 8 °С. Так как CO_2 в воде подземного озера не расходуется на фотосинтез, его содержание зимой и летом мало изменяется (6,2–7,4 мг/л) и величина pH варьирует в небольшом диапазоне 7,7–7,9.

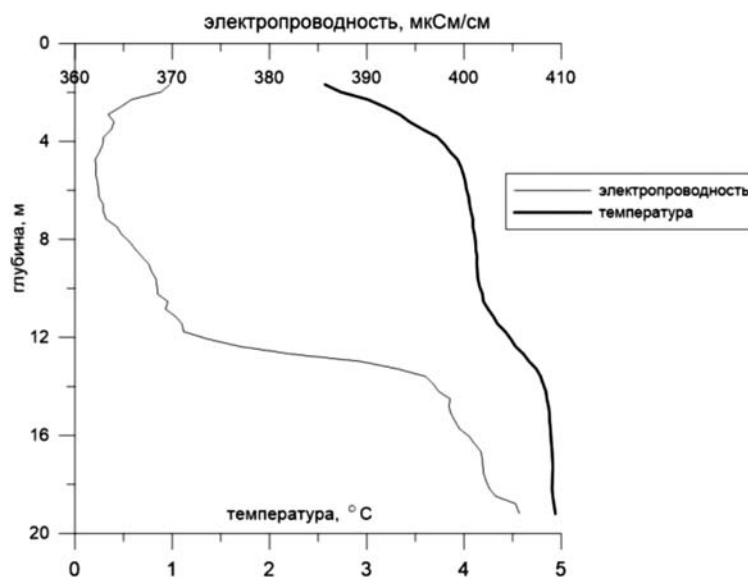


Рис. 3. Вертикальный профиль температуры и электропроводности воды в центре Мраморного каньона (20 марта 2019 г.)

Fig. 3. Vertical temperature and electrical conductivity profiles in the center of the Marble Canyon (March 20, 2019)

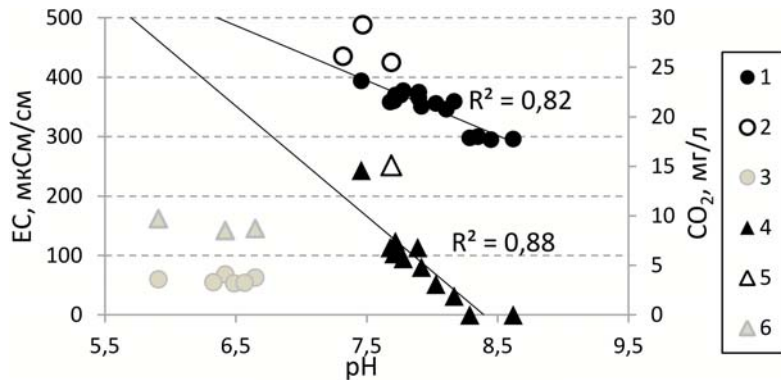


Рис. 4. Электропроводность, pH и CO₂ в подземных и поверхностных водах месторождения Рускеала:

1–3 – электропроводность (ЕС): 1 – карьерные водоемы, 2 – скважина, 3 – река; 4–6 – концентрация CO₂: 4 – карьерные водоемы, 5 – скважина, 6 – река

Fig. 4. Electrical conductivity (EC), pH and CO₂ in groundwater and surface water of the Ruskeala deposit:

1–3 – electrical conductivity (EC): 1 – quarry water bodies, 2 – well, 3 – river; 4–6 – CO₂ concentration: 4 – quarry water bodies, 5 – well, 6 – river

Таблица 1. Химический состав подземных и карьерных вод на территории Горного парка

Table 1. Chemical composition of groundwater and quarry water on the Mining Park territory

Объект Object	Дата Date	Т °C	pH	ПО PI	∑ ионов TDS	ЕС μS/cm	CO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	N-NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	N-NO ₃	N _{общ} N _{total}	Fe
				мгО/л mgO/L	мг/л mg/L													
Скважина Well	16.08.2018	6,0	7,69	0,8	385	425	15,10	55,10	12,80	16,30	3,10	0,023	269,40	17,60	3,6	<0,02		0,56
Колодец Dug well	16.08.2018	6,0	7,32			435												
	20.03.2019	6,0	7,47			488												
Каньон поверхн. слой Сапуон surface layer	13.07.2016		8,35			300												
	16.08.2018	19,5	8,62	3,1	236	296	0	45,7	9,0	1,9	2,4	0,023	149,5	22,5	4,8	<0,02		0,14
	20.03.2019	1,0	7,76	3,3	296	370	6,2	54,3	12,0	2,0	2,8	0,016	188,7	29,0	4,9	0,25		0,05
	03.08.2020	17,4	8,29	3,8	250	298	0	45,8	9,3	2,1	2,2	0,101	160,6	25,6	4,6	<0,02		0,06
	14.08.2021		8,45			295												
27.11.2022	0,8	7,92	3,0	296	351		52,9	10,7	2,9	2,8	0,085	185,0	32,9	5,9	0,20	0,46	0,07	
Каньон придон- ный слой Сапуон bottom layer	20.03.2019	4,5	7,46	4,6	325	405	14,6	59,3	12,4	1,8	2,9	0,442	209,2	29,6	4,8	0,07		0,11
Подзем- ное озеро Under- ground lake	04.05.2018	1,4	7,71	4,3	270	360	6,2	55,4	11,3	2,2	2,8	0,023	176,0	14,4	5,4	0,54		0,13
	16.08.2018	8,0	7,89	2,6	320	372	6,8	58,0	11,6	2,0	2,9	0,023	199,2	36,9	5,4	0,34		0,04
	20.03.2019	0,8	7,68	3,1	291	358	6,8	53,7	11,4	2,1	2,8	0,008	182,7	31,1	4,8	0,22		0,06
	03.08.2020	6,8	7,72	3,2	304	370	7,4	56,2	11,1	2,4	2,9	0,062	189,1	35,0	4,9	0,18		0,05
	27.11.2022	4,0	7,90	4,3	293	365	6,4	51,6	11,7	3,8	2,8	0,10	184,0	30,7	6,3	0,20	0,65	0,05
Оз. Мон- феррана Lake Mont- ferrand	04.05.2018	1,6	7,78	4,3	292	377	5,7	58,6	13,0	2,1	2,8	0,023	193,0	13,0	5,8	0,79		0,09
	16.08.2018	20,0	8,17	3,6	290	359	1,9	50,0	13,3	2,5	3,7	0,062	180,6	33,5	4,8	0,16		0,06
	03.08.2020	18,3	8,03	4,4	286	356	3,1	49,2	12,2	3,0	3,0	0,062	181,5	31,0	5,1	0,07		0,03
	14.08.2021		8,11			346												
27.11.2022	2,2	7,90	3,2	320	375		53,8	13,8	3,3	3,5	0,17	198,1	39,5	5,1	0,29	1,24	0,04	
Р. Тохма- йоки Tohma- joki River	04.05.2018	3,6	5,91	23,1	39	60	9,7	6,0	1,4	1,8	1,2	0,047	5,0	14,2	3,2	0,45		1,00
	16.08.2018	19,6	6,65	21,6	38	63	8,7	5,9	1,4	2,6	1,7	0,163	12,4	7,9	3,6	0,09		1,47
	20.03.2019	0,3	6,42	28,4	54	68	8,5	6,5	1,7	2,7	1,6	0,085	13,1	12,7	3,3	0,05		1,20
	03.08.2020		6,33			55												
	14.08.2021		6,49			53												

Рисунок 4 отражает практически синхронное снижение концентрации CO_2 с ростом величины рН и минерализации воды в карьерных водоемах в отличие от поведения этих показателей в речной воде.

Вода р. Тохмайоки по химическому составу резко отличается от карьерных водоемов, в первую очередь цветностью и минерализацией. Вода в карьерах и скважине малоцветная (6–12 град.), в то время как в р. Тохмайоки достигает 157–216 град., и это объясняет ее местное название – Русколка (от финского *ruskea* – коричневый, рыжий). Причиной служит значительное содержание в речной воде органических веществ (ОВ) и железа: величина перманганатной окисляемости (ПО) достигает 22–28 мгО/л, железа общего – 1–1,5 мг/л. Речная вода среди исследованных объектов отличается минимальными величинами рН и электропроводности (рис. 5).

Для р. Тохмайоки, как и для большинства рек Северного Приладожья, характерно сезонное изменение состава воды: весной при поступлении с водосбора талых кислых вод наблюдается снижение величины рН, рост доли сульфатов в ионном составе и увеличение содержания ОВ [Состояние..., 2007; Комулайнен и др., 2016]. В соответствии с отмеченной особенностью состав речной воды весной 2018 г. характеризовался как сульфатно-кальциевый, слабокислый (рН 5,9). В летнюю межень 2018–2021 гг. показатель рН увеличивался до 6,3–6,65, а состав воды менялся на гидрокарбонатно-кальциевый (табл. 1). Загрязнение речной воды выражалось в появлении нефтепродуктов (0,09 мг/л) и нитратов (0,45 мгN/л) в весенний паводок, а в летнюю межень – в высокой концентрации фосфора общего (69 мкг/л) против 9 мкг/л в зимнюю.

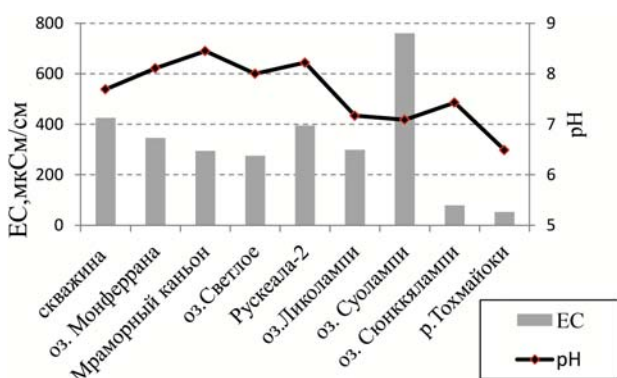


Рис. 5. Электропроводность (ЕС) и рН воды в объектах Горного парка (август 2021)

Fig. 5. Electrical conductivity (EC) and pH of water in the Mining Park objects (August 2021)

Исследования предыдущих лет определили эвтрофный статус реки, основная роль такого состояния принадлежит рассредоточенным (площадным) источникам загрязнения [Состояние..., 2007; Комулайнен и др., 2016].

Малые озера в районе месторождения также высокоцветны (56–153 град.), но в отличие от речной озерные воды характеризуются более высокими показателями рН (7,1–7,4). По минерализации озера очень различаются между собой: электропроводность воды изменяется от 79 мкСм/см (оз. Сюнккялампи) до 300 мкСм/см (оз. Ликолампи) и достигает 760 мкСм/см (оз. Суолампи) (рис. 5). Самое маломинерализованное оз. Сюнккялампи располагается гипсометрически выше всех отмеченных водоемов, получает преимущественно атмосферное питание и не испытывало прямого влияния горных работ. Напротив, два других озера имеют подземное питание и с начала эксплуатации месторождения испытывают постоянную техногенную нагрузку. По свидетельству В. П. Соболевского [1839], «...излишний щебень из главной ломки вывозился через проход, пробитый в скалах с северной стороны прямо в долину, где находятся озера Лико и Суло». Кроме того, оз. Ликолампи находится в непосредственной близости от дробильной фабрики и обжиговых печей известкового завода, окончательно потушенных лишь в 90-х годах прошлого века, а в оз. Суолампи с начала разработки месторождения осуществлялся сток с промышленных площадок и отвалов карьеров.

Концентрации микроэлементов в воде Мраморного каньона, подземного озера и р. Тохмайоки варьируют в большом диапазоне значений: от <0,01 до сотен мкг/л (табл. 2). Большая группа элементов (Sr, Ba, Zn, Fe, Al, U, B, Se, Ni, Cu, Rb, Ga, Li) обнаруживается во всех пробах в концентрациях более 1 мкг/л. В карьерных водах максимальные концентрации отмечаются для Sr и Ba, характерных для условий карбонатакопления (260 и 180 мкг/л соответственно). Поверхностный и придонный слой воды в каньоне незначительно различаются по концентрации элементов, за исключением марганца, содержание которого в придонном слое в восстановительных условиях возросло на два порядка, до 708 мкг/л. В речных слабокислых и высокогумусовых водах хорошо мигрируют Fe и Al (803 и 150 мкг/л) и другие элементы (Cr, Co, Ni, Be), образующие органоминеральные формы. В щелочных карьерных водах некоторые аниогенные элементы (Se, B, Mo, W) присутствуют в концентрациях выше фоновых региональных [Водные..., 2006]. Самым контрастным элементом в исследованных

пробах является уран, концентрации которого в карьерных водах достигают 13,5–18,7 мкг/л, что на три порядка выше фоновой величины для подземных вод региона и содержания в речной воде (табл. 2). Источником урана может служить уранинит в ассоциации с урансодержащим апатитом, рудная минерализация которых связана с Рускеальским разломом, контролирующим размещение урановых рудных объектов в северо-восточном крыле

Кирьяволахтинского купола [Ладожский..., 2020]. Природные водорастворимые формы урана связаны в основном с U (VI). Существенная миграция урана возможна только в окислительных или слабовосстановительных условиях. Практически весь шестивалентный уран в водах в широком интервале pH находится в форме карбонатных комплексов уранила, в щелочных растворах преобладает $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ [Бородулина, Мазухина, 2005].

Таблица 2. Концентрации элементов (мкг/л) в карьерных водах и р. Тохмайоки (20.03.2019)

Table 2. Element concentrations (µg/L) in the quarry water and Tohmajoki River (03/20/2019)

Элемент Element	Река River	Подземное озеро Underground lake	Мраморный каньон Marble Canyon		Региональный фон подземных вод* Regional mean groundwater*
			Поверхность Surface	Придонный слой Bottom layer	
Li	1,99	1,52	1,54	1,41	1,9
Be	0,034	0,002	0,004	0,002	<0,02
B	11,15	16,23	16,51	15,58	10
Al	148,7	3,00	16,98	2,22	35
Sc	3,85	3,64	3,52	3,63	2,5
Ti	5,49	0,70	0,65	1,11	1,6
V	0,50	0,14	0,20	0,29	0,4
Cr	0,64	0,26	0,43	0,35	0,9
Mn	44,5	2,24	2,67	708,5	24,4
Fe	802,7	38,29	45,65	99,25	200
Co	0,27	0,08	0,13	0,12	0,18
Ni	2,72	1,33	1,63	1,46	2
Cu	1,87	1,91	13,43	2,93	2,5
Zn	5,63	6,21	16,94	5,41	36
As	0,45	0,45	0,52	0,48	0,5
Se	12,19	11,44	11,71	12,43	5
Br	0,50	0,79	0,75	0,50	0,5
Rb	2,72	2,83	2,85	2,59	1,7
Sr	27,6	247,7	255,4	263,6	81
Y	0,257	0,013	0,01	0,025	0,17
Zr	0,173	0,006	0,005	0,012	0,05
Nb	0,018	0,004	0,006	0,006	<0,01
Mo	0,12	1,06	1,07	0,32	0,38
Ag	0,006	0,004	0,004	0,003	<0,01
Cd	0,026	0,01	0,367	0,038	0,06
Sn	0,025	0,021	0,056	0,019	0,02
Sb	0,04	0,17	0,19	0,05	0,09
Cs	0,021	0,03	0,036	0,031	0,01
Ba	33,0	142,1	145,6	177,5	57
W	0,021	0,06	0,086	0,195	0,03
Hg	0,065	0,052	0,070	0,098	0,05
Tl	0,085	0,097	0,097	0,089	0,01
Pb	0,283	0,095	0,256	0,185	0,7
Bi	0,003	0,002	0,003	0,002	<0,01
Th	0,038	0,001	0,001	0,001	<0,01
U	0,09	18,75	18,50	13,54	0,09

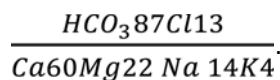
Примечание. *По данным: [Водные..., 2006].

Note. *According to data: [Water..., 2006].

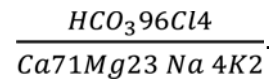
Как известно, на кристаллических щитах нет прямой связи между составом породы и подземных вод [Шварцев, 1998; Бородулина, Левичев, 2019]. Состав подземных вод может определяться составом вмещающих пород только в случае присутствия в них относительно растворимых образований, например карбонатов. Процесс их растворения, происходящий по обобщенной схеме $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$, продолжается до наступления равновесия.

Серия последовательных водных вытяжек из навесок рускеальского мрамора различной степени дробления продемонстрировала резкое повышение величины pH опытных растворов (до pH 9,6) в первые минуты взаимодействия с дистиллированной водой (pH 5,7), затем постепенное понижение показателей в повторных вытяжках и относительную стабилизацию на значениях pH около 8,2–8,5 спустя 2 недели после начала опыта (рис. 6). Электропроводность растворов также резко увеличилась в первые минуты, после чего скорость роста замедлилась, но продолжала повышаться до конца опытов, и через 38 суток электропроводность достигла 120–130 мкСм/см. Степень дробленности породы незначительно влияет на величину pH и электропроводность (рис. 6).

В первые сутки взаимодействия мрамора с водой образовались сильнощелочные слабоминерализованные гидрокарбонатные кальциево-магниевые растворы с заметной долей ионов натрия и хлора:



Осадочное происхождение карбонатных пород объясняет повышенное содержание хлоридов и натрия в растворе первой вытяжки, они легко вымываются из породы в первые минуты. Промытый мрамор образует растворы уже с меньшей долей хлоридов и натрия, и в последнем опыте (время контакта 38 суток) формула ионного состава раствора имеет вид



Тип катионного состава опытных растворов аналогичен типу воды в скважине и карьерах, анионный же состав вытяжек из чистого мрамора отличается полным отсутствием сульфатов, которые в природные воды поступают за счет окисления сульфидов.

Из результатов физико-химического моделирования состава опытных растворов, полученных при выщелачивании мрамора, следует, что с увеличением времени взаимодействия порода-вода индекс насыщения раствора (SI) карбонатами приближается к нулю (равновесию) и возможность растворения минералов уменьшается (табл. 3). Также равновесна с карбонатами вода из скважины, т. е. подземная вода поступает в карьер практически насыщенной. В воде Мраморного каньона степень насыщения изменяется в течение года: в подледных условиях $SI < 0$ и минералы способны растворяться, летом вода перенасыщена карбонатами ($SI > 0$) и их микроскопическая взвесь при преломлении света придает воде каньона характерный зеленовато-голубой цвет.

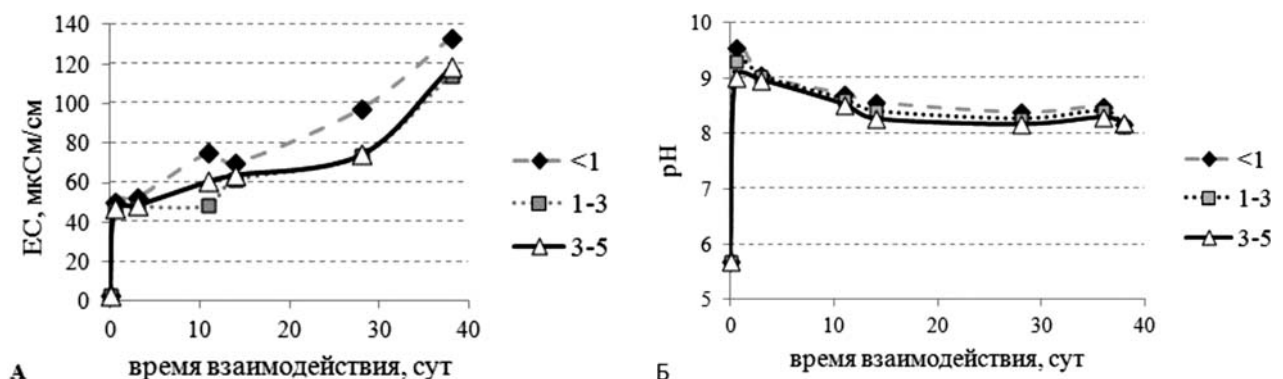


Рис. 6. Изменения электропроводности (ЕС) и pH опытных растворов при контакте дистиллированной воды с мрамором (фракции: <1 мм; 1–3 мм; 3–5 мм) в зависимости от времени контакта. Нулевое время на графике – показатели дистиллированной воды (pH = 5,7 и ЕС = 3 мкСм/см)

Fig. 6. Changes in pH and electrical conductivity (EC) of experimental solutions upon contact of distilled water with marble (fractions: <1 mm; 1–3 mm; 3–5 mm) depending on contact time. Zero time on the graph is the distilled water index (pH = 5.7 and EC = 3 μS/cm)

Таблица 3. Степень насыщения опытных растворов и природной воды относительно карбонатов (результаты термодинамического моделирования, PHREEQC)

Table 3. Degree of saturation of experimental solutions and natural water to minerals (results of thermodynamic modeling, PHREEQC)

Минерал Mineral	Индекс насыщения (SI) Saturation Index (SI)				
	Опытный раствор Experimental solution		Скважина Well	Мраморный каньон Marble Canyon	
	3 сут 3 day	38 сут 38 day		Март 2019 March 2019	Август 2020 August 2020
Calcite CaCO_3	-0,93	0	0,03	-0,02	0,92
Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	-2,21	-0,33	0,02	-0,43	1,48

Характеризуя газовый состав подземной воды на месторождении, следует отметить повышенное содержание радона и гелия в воде скважины: $Rn = 1500$ Бк/л, $He = 1,6 \cdot 10^{-3}$ мл/л. В воде колодца содержание радона уже значительно меньше – 90 Бк/л, в подземном озере – 7 Бк/л, а в открытых карьерных водоемах радон не обнаруживается. Как известно, Северное Приладожье – один из наиболее радоно-аномальных районов Карелии, совпадающий с одной из радиогеохимических линейных зон региона [Савицкий и др., 1992; Бородулина, Левичев, 2019]. В Каталоге минеральных вод СССР [1969] среди радоновых проявлений на территории Карелии на Рускеальском месторождении отмечена скважина с концентрацией радона около 6000 Бк/л.

Также характерно для подземных вод Северного Приладожья высокое фоновое содержание растворенного гелия – 10^{-2} мл/л, что на три порядка выше концентрации, равновесной с атмосферой. Максимальная величина в Северном Приладожье (0,55 мл/л) отмечена в районе г. Питкяранты [Ресурсы..., 1987; Богачев, Бородулина, 2008]. Как известно, повышенные концентрации гелия характерны для подземных вод замедленного водообмена, что позволяет выявлять современные мобильные разломы [Якуцени, 1968; Яницкий, 1979; Tokarev et al., 2019]. Природа гелиевых аномалий – это разгрузка вод глубокой циркуляции по зонам повышенной проницаемости в районах масштабной блоковой неотектонической активности в северной части котловины Ладожского озера [Ладожская..., 2020].

Высокая концентрация гелия ($2,4 \cdot 10^{-3}$ мл/л) в придонном слое Мраморного каньона, практически такая же, как в воде скважины, является прямым индикатором подземного питания карьера. Даже в подледном слое каньона зафиксирована повышенная концентрация гелия

($2,5 \cdot 10^{-4}$ мл/л), а в подземном озере гелий в количестве $1,8-2,6 \cdot 10^{-4}$ мл/л сохраняется и в летний период.

Изотопный состав воды (дейтерий, кислород-18) в опробованных объектах варьирует в достаточно большом диапазоне и демонстрирует изменение состава поступающей подземной воды в водоем (рис. 7). Изотопный состав воды Рускеальской скважины близок к среднему показателю подземных вод Карелии ($^{18}\text{O} \approx -13,4$ ‰ и $^2\text{H} \approx -97$ ‰) [Tokarev et al., 2019; Borodulina et al., 2023]. В карьерных водоемах в результате смешения подземной воды с атмосферными осадками и испарения с открытой поверхности в изотопном составе происходит закономерное увеличение доли тяжелых изотопов, поэтому на классической $\delta^{21}\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ диаграмме наблюдается смещение фигуративных точек от локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) (рис. 7). Изотопный состав воды в карьерах летом (август 2018 г.) за счет испарения оказался более тяжелым по сравнению с подземной водой, угловой коэффициент уравнения регрессии, аппроксимирующего результаты летних анализов, близок к теоретическому значению для неравновесных условий испарения и составляет 4,56 [Dansgaard, 1964; Ferronsky, Polyakov, 2009]. По точке пересечения линии аппроксимации и ЛЛМВ можно оценить начальный изотопный состав воды в водоемах: $\delta^{18}\text{O} \approx -13,8$ ‰ и $\delta^{21}\text{H} \approx -100$ ‰ (рис. 7) [Tokarev et al., 2019]. Эта величина соответствует среднему составу подземных вод региона и подтверждает подземный источник формирования карьерных вод. Проба из подземного озера, отобранная в мае 2018 г., отличается более легким изотопным составом, чем летние карьерные пробы, и в большей степени сохраняет черты исходной подземной воды (рис. 7).

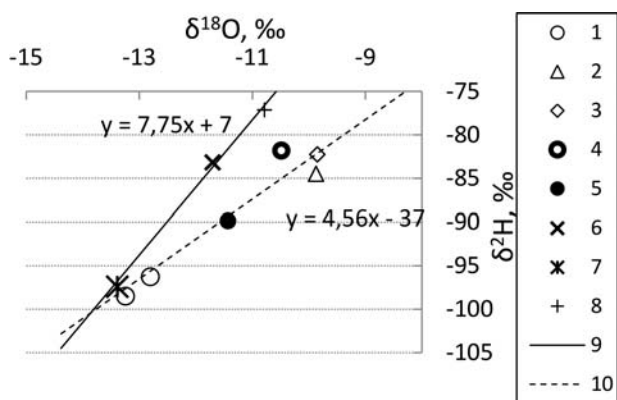


Рис. 7. Изотопный состав водных объектов Горного парка:

1–4 – объекты, опробованные в августе 2018 г. (1 – скважина, колодец; 2 – Мраморный каньон; 3 – оз. Монферрана; 4 – подземное озеро), 5 – подземное озеро (май 2018), 6 – средний состав атмосферных осадков Карелии, 7 – средний состав подземных вод Карелии, 8 – локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ), 9 – линия аппроксимации точек опробования (август 2018)

Fig. 7. Isotopic composition of water bodies in the Mining Park:

1–4 – objects sampled in August 2018 (1 – well, dug well; 2 – Marble Canyon; 3 – Lake Montferrand; 4 – underground lake), 5 – underground lake (May 2018), 6 – average composition of atmospheric precipitation in Karelia, 7 – average composition of groundwater in Karelia, 8 – local line of meteoric waters (LLMW), 9 – approximation line of sampling points (August 2018)

Несмотря на сходство подземной и карьерной воды по минерализации и химическому составу, основное отличие – повышенное содержание нитратного азота в исследованных водоемах (до 0,8 мгN/л) по сравнению с фоновыми показателями для поверхностных (0,01 мгN/л) и подземных (0,2 мгN/л) вод Карелии [Лозовик, Бородулина, 2009]. Причем в период весеннего половодья содержание нитратного азота в воде карьеров было выше, чем в р. Тохмайоки (табл. 1), хотя в речных водах концентрации всех форм азота обычно выше, чем в озерных, в которых происходит переход минеральных форм азота в органическую и захоронение ОВ в донных отложениях.

Основным источником поступления соединений азота на территорию Карелии в естественных условиях являются атмосферные осадки, в которых медианные значения $N_{\text{общ}}$ с севера на юг изменяются в пределах 0,33–0,42 мгN/л, а преобладающей формой азота являются NO_3^- и NH_4^+ [Лозовик, Потапова, 2006]. В окислительной среде водоемов NH_4^+ подвергается нитрификации, конечным продуктом которой являются нитраты, которые, в свою

очередь, потребляются бактериями и водорослями с образованием органического азота.

Прямые определения $N_{\text{общ}}$ в отдельных пробах карьерных вод Рускеалы показали значения 0,46–1,24 мгN/л (табл. 1), содержания $N_{\text{орг}}$ составили 0,17–0,78 мгN/л, что значительно выше средней концентрации для подземных вод (0,06 мгN/л) и сравнимо с поверхностными (0,44 мгN/л) [Лозовик, Бородулина, 2009]. Для поверхностных вод Карелии характерно низкое содержание минеральных форм азота и достаточно стабильное органического. Ситуация, когда сумма минеральных форм азота близка к органическим, что наблюдается в нашем случае, характерна для водоемов с антропогенно трансформированными водосборами. Таким образом, расширение туристской инфраструктуры и возрастающая рекреационная нагрузка на территорию Горного парка приводят к тому, что нитраты, как конечный продукт трансформации азотных соединений, поступающих с атмосферными выпадениями и хозяйственно-бытовым загрязнением, накапливаются в воде карьеров в условиях слабого водообмена и слабого развития биоты.

Заключение

Исследования водоемов природного и искусственного происхождения на территории Горного парка Рускеала показали, что на месторождении мрамора в горных выработках (Мраморный каньон, оз. Монферрана, подземное озеро) сформировались водоемы, химический состав воды которых идентичен составу подземных вод по химическому типу (гидрокарбонатные кальциево-магниевые) и минерализации (0,25–0,32 г/л). Изотопно-химический и газовый состав поступающих в выработки подземных вод трансформируется в карьерах в зависимости от их площади, открытости к атмосфере и сезонности. Чем больше площадь открытого водного зеркала в выработках, тем ниже минерализация воды и больше диапазон ее сезонных колебаний. Из результатов физико-химического моделирования следует, что подземная вода поступает в карьер практически насыщенной по отношению к карбонатам, в открытых условиях в течение года равновесие нарушается: зимой минералы способны растворяться, летом вода пересыщена карбонатами и их микроскопическая взвесь придает воде каньона характерный цвет.

Вода р. Тохмайоки отличается от карьерных вод высокой цветностью и малой минерализацией. Малые озера на территории парка также высокоцветны, но минерализация их воды из-

меняется в зависимости от связи с подземным стоком и влиянием горных работ.

В карьерных водах зафиксированы повышенные концентрации многих микроэлементов; самым контрастным из них является уран, источником которого служит рудная минерализация, связанная с Рускеальским разломом. С радиогеохимическими зонами связано и высокое содержание радона в подземной воде месторождения, следы радона обнаруживаются и в воде подземного озера. Высокая концентрация гелия в карьерных водах является прямым индикатором подземного питания карьера. Исследования изотопного состава воды в водоемах также подтверждают подземный источник формирования карьерных вод.

В отличие от подземных в карьерных водах фиксируются азотные соединения в концентрациях выше фоновых, что может свидетельствовать о загрязнении слабопроточных водоемов в условиях возрастающей рекреационной нагрузки. Необходимы дальнейшие исследования по оценке влияния хозяйственной деятельности на состояние водной среды территории.

Литература

- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике* / Ред. П. А. Лозовик, Н. А. Ефременко. СПб: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Анищенко О. Н., Кудрев А. Ф.* Отчет о разведке месторождения мрамора Рускеала-1 в Сортавальском р-не КФССР в 1952–1953 гг. Кар. ТФГИ, 1954.
- Богачев М. А., Бородулина Г. С.* Связь аномалий гелия в подземных водах Карелии с тектоническими зонами // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Мат-лы 14-й междунар. конф. (Петрозаводск, 27–31 октября 2008 г.). Часть 1. Петрозаводск, 2008. С. 62–63.
- Борисов И. В.* Подземные выработки месторождения мрамора Рускеала-I (Карелия) // Спелеология и спелеология. 2015. № 6. С. 218–222.
- Борисов И. В.* Рускеальские каменоломни. Сортвала: Ракурс, 2010. 23 с.
- Бородулина Г. С., Левичев М. А.* Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 71–75.
- Бородулина Г. С., Мазухина С. И.* Подземные воды Заонежья // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 48–54.
- Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества* / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Портттикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. 263 с.
- Гайдин А. М.* Преобразование карьеров в озера // Метеорология и гидрология. 2012. № 7. С. 77–91.
- Геология и петрология свекофеннид Приладожья* / Ред. В. А. Глебовицкий. СПб.: Изд. СПб. ун-та, 2000. 200 с.
- Дорога горных промыслов* / Ред. В. А. Шеков. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 362 с.
- Каталог минеральных вод СССР. Приложение к карте минеральных вод СССР масштаба 1:4 000 000* / Глав. ред. В. В. Иванов. М., 1969. 287 с.
- Каталог озер и рек Карелии* / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 286 с.
- Комулайнен С. Ф., Лозовик П. А., Круглова А. Н., Барышев И. А., Галибина Н. А.* Оценка экологического состояния рек Северного побережья Ладожского озера по химическим показателям и структуре гидробиоценозов // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 3. С. 277–286. doi: 10.7868/S0321059616030093
- Кузнецов А. Б., Горохов И. М., Азимов П. Я., Дубинина Е. О.* С- и Sr-хемостратиграфический потенциал палеопротерозойских осадочных карбонатов в условиях среднетемпературного метаморфизма: мрамора Рускеала, Карелия // Петрология. 2021. Т. 29, № 2. С. 172–194. doi: 10.31857/S0869590321010039
- Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения)* / Ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.
- Лозовик П. А., Потапова И. Ю.* Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С.* Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.
- Мустонен А. А., Нокелайнен С. И., Нокелайнен М. В.* Отчет о геологоразведочных работах и подсчете запасов на 01.01.1957 г., проведенных на месторождении Рускеала II в Сортавальском р-не КАСССР в 1956–57 гг. Кар. ТФГИ, 1957.
- Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии* / Отв. ред. В. С. Самарина. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1987. 151 с.
- Савицкий А. В., Титов В. К., Мельников В. К.* Уран, торий, калий в горных породах Карелии и вопросы радиоэкологии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. С. 99–113.
- Сахаров А. С.* Отчет о работах геологоразведочной партии на месторождении Рускеала-I в 1940 г. Кар. ТФГИ, 1940.
- Смирнова А. Г., Рыцарева З. В.* Отчет о результатах ревизионных работ, проведенных на месторождении мрамора Рускеала-I в 1967–69 гг. (Сортавальский район КАСССР). Кар. ТФГИ, 1969.
- Соболевский В. П.* Геогностическое обозрение старой Финляндии и описание Рускольских мраморных ломок. СПб., 1839. 140 с.
- Соколов В. А.* Геология и литология карбонатных пород среднего протерозоя Карелии. М.; Л., 1963. 183 с.

Состояние водных объектов Республики Карелия / Ред. П. А. Лозовик, Т. П. Куликова, Н. Н. Мартынова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 210 с.

Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., испр. и доп. М.: Недра, 1998. 336 с.

Шеков В. А. Природные риски и системы мониторинга: на примере объектов горнопромышленного наследия Карелии (Рускеальский горный парк) // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 2. С. 214–227. (На англ.). doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-214-227

Якуцени В. П. Геология гелия. Л.: Недра, 1968. 232 с.

Яницкий И. Н. Гелиевая съемка. М.: Недра, 1979. 96 с.

Borodulina G., Tokarev I., Yakovlev E. Isotope composition of natural water in the Lake Onega basin // Water. 2023. Vol. 15. Art. 1855. doi: 10.3390/w15101855

Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. Vol. 16(4). P. 436–463. doi: 10.3402/tellusa.v16i4.8993

Ferronsky V. I., Polyakov V. A. Isotopes of the Earth's hydrosphere. Netherlands: Springer, 2012. 630 p.

Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. User's guide to PHREEQC (Version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259. Denver: U.S. Geological Survey, 1999.

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Subetto D. A., Voronyuk G. Y., Zobkov M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene–Holocene in groundwater stable isotopes (^2H , ^{18}O) // Quat. Int. 2019. Vol. 524. P. 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022

References

Anishchenkova O. N., Kudrev A. F. Report on exploration of the Ruskeala-1 marble deposit in the Sortavala District of the KFSR in 1952–1953. Kar. TFGI, 1954. (In Russ.)

Bogachev M. A., Borodulina G. S. Relationship of helium anomalies in groundwater of Karelia with tectonic zones. *Svyaz' poverkhnostnykh struktur zemnoi kory s glubinnymi: Mat-ly 14-i mezhdunar. konf. (Petrozavodsk, 27–31 okt. 2008 g.) = Relationship of surface structures of the Earth's crust with deep ones: Proceed. of the 14th int. conf. (Petrozavodsk, Oct. 27–31, 2008)*. Pt. 1. Petrozavodsk; 2008. P. 62–63. (In Russ.)

Borisov I. V. Ruskeala quarries. Sortavala: Rakurs; 2010. 23 p. (In Russ.)

Borisov I. V. Underground workings of the Ruskeala-1 marble deposit (Karelia). *Speleologiya i spelestologiya = Speleology and Speleostology*. 2015;6:218–222. (In Russ.)

Borodulina G. S., Levichev M. A. Resources and geochemistry of groundwater in Karelia. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2019;3:71–75. (In Russ.)

Borodulina G. S., Mazukhina S. I. Groundwater of the Zaonezhye area. *Ekologicheskie problemy osvoeniya mestorozhdeniya Srednyaya Padma = Environmental problems of the Middle Padma deposit development*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2005. P. 48–54. (In Russ.)

Borodulina G., Tokarev I., Yakovlev E. Isotope composition of natural water in the Lake Onega basin. *Water*. 2023;15:1855. doi: 10.3390/w15101855

Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964;16(4):436–463. doi: 10.3402/tellusa.v16i4.8993

Ivanov V. V. (ed.). Catalogue of mineral waters of the USSR. Appendix to the map of mineral waters of the USSR at a scale of 1:4,000,000. Moscow; 1969. 287 p. (In Russ.)

Ferronsky V. I., Polyakov V. A. Isotopes of the Earth's hydrosphere. Netherlands: Springer; 2012. 630 p.

Filatov N. N., Litvinenko A. V. (eds.). Catalogue of lakes and rivers of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2001. 286 p. (In Russ.)

Filatov N., Litvinenko A., Syarkioya A., Porttikivi R., Regerand T. (ed.). Water resources of the Republic of Karelia and ways of their use for drinking water supply. Experience of Karelian-Finnish co-operation. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. 263 p. (In Russ.)

Gaidin A. M. Conversion of quarries into lakes. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2012;7:77–91. (In Russ.)

Glebovitskii B. A. (ed.). Geology and petrology of the svekofennides of the Ladoga area. St. Petersburg: SPb. Univ.; 2000. 200 p. (In Russ.)

Komulainen S. F., Lozovik P. A., Kruglova A. N., Baryshev I. A., Galibina N. A. Assessment of the ecological state of the rivers of the Northern coast of Lake Ladoga by chemical indicators and structure of hydrobiocenoses. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2016;43(3):277–286. (In Russ.). doi: 10.7868/S0321059616030093

Kuznetsov A. B., Gorokhov I. M., Azimov P. Ya., Dubinina E. O. C- and Sr-chemostratigraphic potential of Palaeoproterozoic sedimentary carbonates under conditions of mid-temperature metamorphism: Ruskeala marbles, Karelia. *Petrologiya = Petrology*. 2021;29(2):172–194. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869590321010039

Lozovik P. A., Borodulina G. S. Nitrogen compounds in surface and subterranean waters of Karelia. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2009;36(6):694–704. (In Russ.)

Lozovik P. A., Efremenko N. A. (ed.). Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Kulikova T. P., Martynova N. N. (eds.). Condition of water bodies of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 210 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Potapova I. Yu. Influx of chemical substances with atmospheric precipitation onto the territory of Karelia. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(1):111–118. (In Russ.)

Mustonen A. A., Nokelainen S. I., Nokelainen M. V. Report on geological exploration works and calculation of reserves as of 01.01.57, conducted at the Ruskeala II deposit in the Sortavala District of the KASSR in 1956–57. Kar. TFGI; 1958. (In Russ.)

Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. User's guide to PHREEQC (Version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport,

and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259. Denver: U.S. Geological Survey; 1999.

Samarina V. S. (ed.). Resources and geochemistry of groundwater in Karelia. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1987. 151 p. (In Russ.)

Sakharov A. S. Report on the work of the geological exploration party at the Ruskeala 1 deposit in 1940. Kar. TFGI; 1940. (In Russ.)

Savitskii A. V., Titov V. K., Mel'nikov V. K. Uranium, thorium, potassium in rocks of Karelia and issues of radioecology. Petrosavodsk: KarRC RAS; 1992. P. 99–113. (In Russ.)

Sharov N. V. (ed.). Ladoga Proterozoic structure (geology, deep structure and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 435 p. (In Russ.)

Shekov V. A. (ed.). The mining road. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. 362 p. (In Russ.)

Shekov V. A. Natural risks and monitoring systems: Case study of the mining-industrial heritage objects of Karelia (Ruskeala Mining Park), Russia. Herald of the MSTU. 2021;24(2):214–227. doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-214-227

Shvartsev S. L. Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone. 2nd ed., rev. and enl. Moscow: Nedra; 1998. 336 p.

Smirnova A. G., Rytsareva Z. V. Report on the results of the audit work carried out at the Ruskeala-I marble deposit in 1967-69. (Sortavala District, KASSR). Kar. TFGI; 1969. (In Russ.)

Sobolevskii V. P. Geognostic survey of old Finland and description of the Ruskol marble quarries. St. Petersburg; 1839. 140 p. (In Russ.)

Sokolov V. A. Geology and lithology of carbonate rocks of the middle Proterozoic of Karelia. Moscow-St. Petersburg; 1963. 183 p. (In Russ.)

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Subetto D. A., Voronyuk G. Y., Zobkov M. B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene–Holocene in groundwater stable isotopes (²H,¹⁸O). Quat. Int. 2019;524: 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022

Yakutseni V. P. The geology of helium. Leningrad: Nedra; 1968. 232 p. (In Russ.)

Yanitskii I. N. Helium survey. Moscow: Nedra; 1979. 96 p. (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 22.12.2025; принята к публикации / accepted: 17.03.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Бородулина Галина Сергеевна

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: bor6805@yandex.ru

Токарев Игорь Владимирович

д-р геол.-мин. наук, главный специалист
проблемной лаборатории глубинной метагеологии

e-mail: torarev_iv@pers.spmi.ru

Медведев Павел Владимирович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории литологии и геохимии

e-mail: pmedved@krc.karelia.ru

Шеков Виталий Александрович

канд. техн. наук, заместитель директора
по научной работе

e-mail: shekov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Borodulina, Galina

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Tokarev, Igor

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Specialist,
Deep Earth Metageology Research Laboratory

Medvedev, Pavel

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher,
Head of Laboratory

Shekov, Vitaly

Cand. Sci. (Tech.), Deputy Director for Science

УДК 556.5:555.5.06

ДВУХКОНТУРНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗА ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В ОЗЕРАХ

**В. С. Валиев, Д. В. Иванов*, А. Б. Александрова, И. И. Зиганшин,
Р. Р. Хасанов**

*Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан
(ул. Даурская, 28, Казань, Россия, 420087), *water-rf@mail.ru*

Пресноводные озера, выступая аккумуляторами вещества, поступающего с водосборных территорий, подвержены риску внутренней биогенной и токсической нагрузки, инициируемой сменой окислительно-восстановительных условий на границе «вода – донные отложения». На основе синхронизированных данных по химическому и гранулометрическому составу почв водосборов, донных отложений, а также гидрохимических характеристик водных масс 38 озер Республики Татарстан предложена и верифицирована двухконтурная модель регуляции окислительно-восстановительного режима водоемов. Модель включает динамический редокс-контур, регулируемый постседиментационными процессами трансформации лабильного органического вещества, и стабилизирующий сорбционный контур, связанный с накоплением в донных отложениях устойчивого органического вещества (гумуса) и тонкодисперсных минеральных частиц терригенного генезиса. С использованием гидрохимических индикаторов (соотношение $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, ХПК/БПК₅, концентрации O_2 , Fe, Mn, PO_4^{3-}) формализованы четыре фазы (зоны) окислительно-восстановительного состояния системы – от аэробной до сульфат-редукционной. Методом Random Forest установлено, что положение водоема/его участка в описываемом фазовом пространстве с высокой точностью ($R^2 = 0.91$, ассигасу = 0.89) предсказывается всего четырьмя стабильными параметрами: содержанием органического вещества в донных отложениях (вектор активации редокс-процессов), содержанием тонкодисперсных частиц в почвах водосбора (вектор стабилизации), а также содержанием азота в почвах и пелитовой фракции в осадках. Результаты обосновывают переход от реактивного мониторинга качества воды к проактивному управлению факторами водосбора и открывают возможности для количественного прогнозирования устойчивости озерных экосистем к эвтрофированию и вторичному загрязнению.

Ключевые слова: озера; водосбор; окислительно-восстановительный режим; внутренняя биогенная нагрузка; модели; прогнозная оценка

Для цитирования: Валиев В. С., Иванов Д. В., Александрова А. Б., Зиганшин И. И., Хасанов Р. Р. Двухконтурная модель формирования и прогноза окислительно-восстановительных условий в озерах // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 64–78. doi: 10.17076/lim2323

V. S. Valiev, D. V. Ivanov*, A. B. Alexandrova, I. I. Ziganshin, R. R. Khasanov. A TWO-LOOP MODEL FOR THE FORMATION AND PREDICTION OF REDOX CONDITIONS IN LAKES

*Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences (28 Dauruskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia), *water-rf@mail.ru*

Freshwater lakes, as accumulators of substances from their catchment areas, are vulnerable to internal nutrient and toxic loads caused by shifts in redox conditions at the water-sediment interface. Based on synchronized data on the chemical and particle size distribution of catchment soils, sediments, and the hydrochemical characteristics of water masses in 38 lakes in the Republic of Tatarstan, a two-loop model for regulating the redox regime of water bodies has been proposed and verified. The model includes a dynamic redox circuit regulated by post-sedimentation processes of transformation of labile organic matter, and a stabilizing sorption circuit associated with the accumulation of stable organic matter (humus) and clay particles of terrigenous genesis in bottom sediments. Using hydrochemical indicators ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio, COD/BOD₅, O₂, Fe, Mn, PO₄³⁻ concentrations), four phases (zones) of the oxidation-reduction state of the system were formalized – from aerobic to sulfate-reducing. The Random Forest method established that the position of a reservoir/its section in the described phase space is predicted with high accuracy ($R^2 = 0.91$, accuracy = 0.89) by only four stable parameters: the content of organic matter in bottom sediments (the activation vector of redox processes), the content of fine particles in soils of the catchment area (the stabilization vector), as well as the content of nitrogen in soils and clay particles in sediments. The results substantiate a transition from reactive water quality monitoring to proactive management of catchment factors, and open up opportunities for quantitative prediction of the resilience of lake ecosystems to eutrophication and secondary pollution.

Keywords: lakes; catchment; oxidation-reduction regime; internal nutrient load; models; predictive assessment

For citation: Valiev V. S., Ivanov D. V., Alexandrova A. B., Ziganshin I. I., Khasanov R. R. A Two-loop model for the formation and prediction of redox conditions in lakes. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 64–78. doi: 10.17076/lim2323

Введение

Пресноводные озера представляют собой достаточно уязвимые компоненты глобальной гидросферы. Одновременно они выполняют важнейшие экосистемные, хозяйственные и рекреационные функции. В условиях многофакторной антропогенной нагрузки одной из наиболее острых и труднорешаемых проблем остается эвтрофикация, сопровождающаяся глубокой трансформацией химического состава воды и структурно-функциональной организации озерных экосистем.

Исследования процессов антропогенного эвтрофирования и химического загрязнения водных экосистем чаще всего фокусируются на оценке показателей внешней биогенной нагрузки, описывающей поступление вещества с водосборных территорий, и отклика экосистемы на эту нагрузку. Вместе с тем к настоящему времени собрано достаточно доказательств, что основной депонирующий компонент

водной экосистемы – донные отложения – выступает не пассивным аккумулятором, а динамичным буферным резервуаром и потенциальным внутренним источником вторичного загрязнения водных масс. Накопление в донных отложениях соединений биогенных элементов (азота и фосфора) и тяжелых металлов чаще всего является следствием долговременного воздействия диффузных и(или) сосредоточенных источников загрязнения и одновременно фактором, способным длительное время поддерживать дестабилизацию водной экосистемы после снижения и даже полной элиминации внешней нагрузки, инициируя процесс так называемого внутреннего (вторичного) эвтрофирования. Ключевым механизмом, запускаящим этот процесс, выступает изменение окислительно-восстановительных (редокс) условий на границе раздела фаз «вода – донные отложения».

В аэробных условиях присутствующие в поверхностном слое отложений оксиды и гидро-

оксида железа и марганца выступают мощным геохимическим барьером, прочно сорбируя минеральные формы фосфора и металлы из придонного горизонта вод. При дефиците растворенного кислорода, вызванном разложением периодически обновляемого пула органических веществ, в верхних слоях осадка последовательно активируются микробно-опосредованные процессы восстановления нитратов, марганца (IV), железа (III) и сульфатов. Это приводит к растворению оксидной матрицы донных отложений и лавинообразному выбросу сорбированных форм фосфора и металлов в придонную воду. Таким образом, из долговременного стока загрязняющих веществ седименты способны трансформироваться в активный их источник, формируя трофический статус водоема и токсикологическую напряженность [Redshaw et al., 1990; Мартынова, 2010].

Важнейшим, но часто недооцениваемым фактором, определяющим не только скорость накопления веществ в донных отложениях озер, но и потенциал их ремобилизации, является массоперенос вещества с водосборных территорий. Первичным геохимическим фильтром и барьером на пути миграции химических элементов и соединений в системе «водоем – водосбор» выступает почвенный покров. Гранулометрический состав, уровни содержания и качество органического вещества почв определяют количественное и качественное состояние поступающих в водоем взвешенных частиц и миграционно связанных с ними соединений биогенных элементов и металлов. Следовательно, для понимания функционирования озерной экосистемы и прогнозирования ее отклика на воздействия необходим комплексный анализ триады взаимосвязанных компонентов: почвы водосбора – водные массы – донные отложения.

Следует заметить, что в научной литературе сохраняется определенный дефицит исследований, которые количественно интегрируют данные по этим трем компонентам с целью выявления управляющих факторов и построения диагностических схем, структурирующих причинно-следственные связи между процессами поступления, аккумуляции и ремобилизации элементов и соединений в сопряженных геохимических системах. Особенно актуальной представляется разработка методов, позволяющих не только констатировать текущее состояние, но и прогнозировать устойчивость водных экосистем и(или) риск их перехода в неблагоприятное состояние (например, от аэробного к устойчиво-анаэробному) на основе стабильных и консервативных характеристик, присущих почвам и донным отложениям.

Целью исследования являлась разработка концептуальной и количественной модели, связывающей характеристики почв водосбора, геохимический состав и свойства донных отложений и гидрохимический режим озер для оценки состояния и прогнозирования риска внутренней биогенной и токсикологической нагрузки на водные экосистемы.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- провести комплексный анализ взаимосвязей между гранулометрическим и химическим составом почв водосбора, донных отложений и химическим составом придонной воды;
- на основе гидрохимических и редокс-индикаторов выделить и формализовать типичные состояния (зоны) озерной экосистемы, отражающие различную степень активации восстановительных процессов на границе «вода – донные отложения»;
- оценить роль почв как фактора, регулирующего поступление вещества и предопределяющего соотношение стабилизирующих (сорбционных) и дестабилизирующих (редокс) внутриводоемных процессов;
- разработать подход к прогнозной оценке состояния качества вод на основе показателей состава и свойств почв и донных отложений озер с применением методов многомерной статистики и машинного обучения.

Материалы и методы

В основу построения модели легли данные комплексных исследований физико-химического состава воды, донных отложений и почв водосборных территорий 38 озер Республики Татарстан, имеющих статус особо охраняемых природных территорий, расположенных в различных физико-географических регионах республики: Предкамье (южная тайга и лесостепь), Предволжье и Закамье (северная лесостепь) (рис. 1). Отбор проб исследуемых сред выполнен в июне–июле 2019 г. и был полностью синхронизирован, что позволило получить достоверный геохимический срез системы «водоем – водосбор».

По генезису котловин преобладающая часть озер (29) имеют суффозионно-карстовое и карстовое происхождение, по четыре – искусственное (копани) и старичное, одно озеро является «окном» в болоте. Озера отличаются высокая вариабельность морфометрических показателей, отражающая их разнообразное происхождение. Доминируют озера с площадью водного зеркала от 1 до 10 га с малыми (5–10 м) и очень малыми (<5 м) глубинами и малым объемом (до 0,5 км³).

В пробах гумусовых горизонтов почв и поверхностных (0–10 см) слоях донных отложений определяли гранулометрический состав пипет-методом (ГОСТ 12536-2014), содержание органического вещества (в донных отложениях – по потерям при прокаливании, в почвах – по Тюрину (ГОСТ 26213-91)), реакцию среды (ГОСТ 26423-85), азот (ГОСТ 26107-84) и фосфор (ГОСТ 26261-84) валовые. Металлы (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Fe) из почв и донных отложений извлекали 5н HNO₃ (РД 52.18.191-89). Гидрохимические показатели озерных вод анализировали общепринятыми методами по аттестованным методикам. Концентрацию металлов в растворе определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AAnalyst 400 (Perkin Elmer).

Показатели, сформировавшие аналитический кортеж данных, представлены на рис. 2. Основные закономерности взаимосвязей и особенности их распределения получены в результате оценки 99 полных кортежей данных. Верификация построенной модели осуществлялась на примере пяти водных объектов (15 кортежей), не вошедших в основной аналитический набор.

Результаты и обсуждение

В качестве одного из ведущих факторов, определяющих характер накопления и свойства донных отложений, рассматривался почвенный покров водосборных территорий озер.

Почвенный покров Республики Татарстан отличается выраженная широтная зональность. В северной ее части – Предкамье (рис. 1) – преобладают дерново-подзолистые почвы на делювиальных суглинках и древнеаллювиальных отложениях. Характерной их особенностью является светло-серый или серый гумусовый горизонт мощностью до 25 см; содержание органического вещества редко превышает 4 %. В гранулометрическом спектре преобладают легкосуглинистые разновидности. Реакция среды кислая или слабокислая.

В Предкамье и в северной части Предволжья и Закамья значительные площади занимают серые лесные почвы. Материнскими породами для них служат делювиальные и лессовидные суглинки, реже древнеаллювиальные отложения. Мощность гумусового горизонта варьирует от 20 до 30 см у светло-серых и серых и до 30–40 см у темно-серых лесных почв.

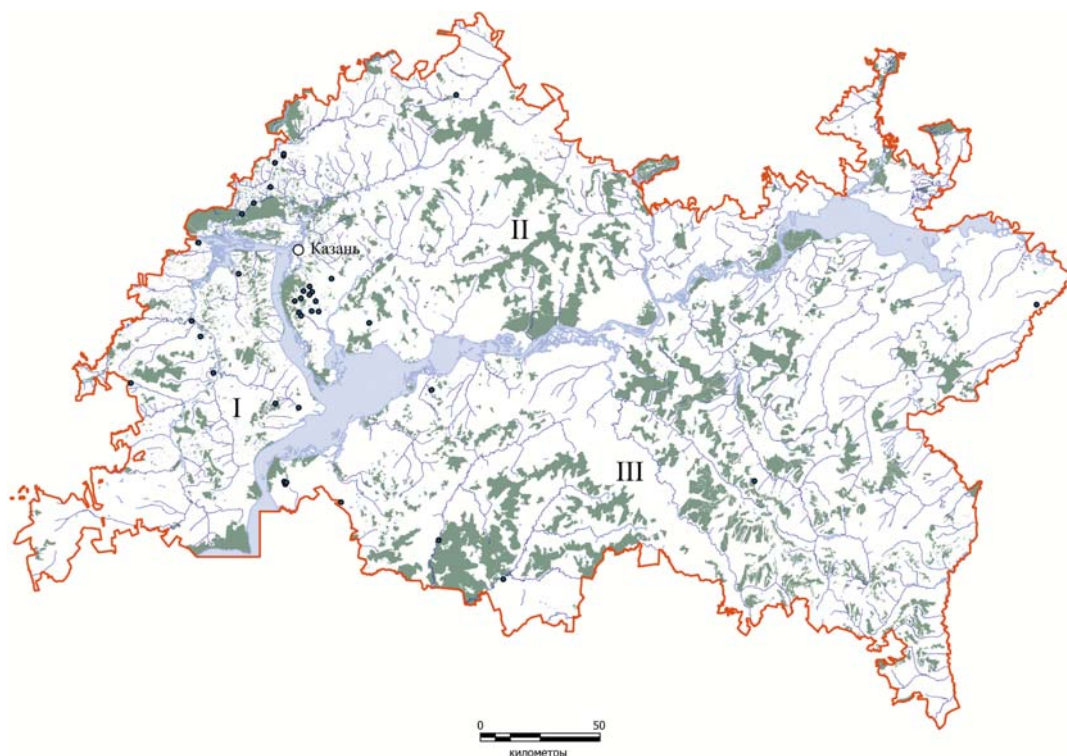


Рис. 1. Расположение исследуемых озер на карте Республики Татарстан.

Физико-географические регионы: I – Предволжье, II – Предкамье, III – Закамье

Fig. 1. Location of the studied lakes on the map of the Republic of Tatarstan.

Physical-geographical regions: I – Pre-Volga region, II – Pre-Kama region, III – Trans-Kama region

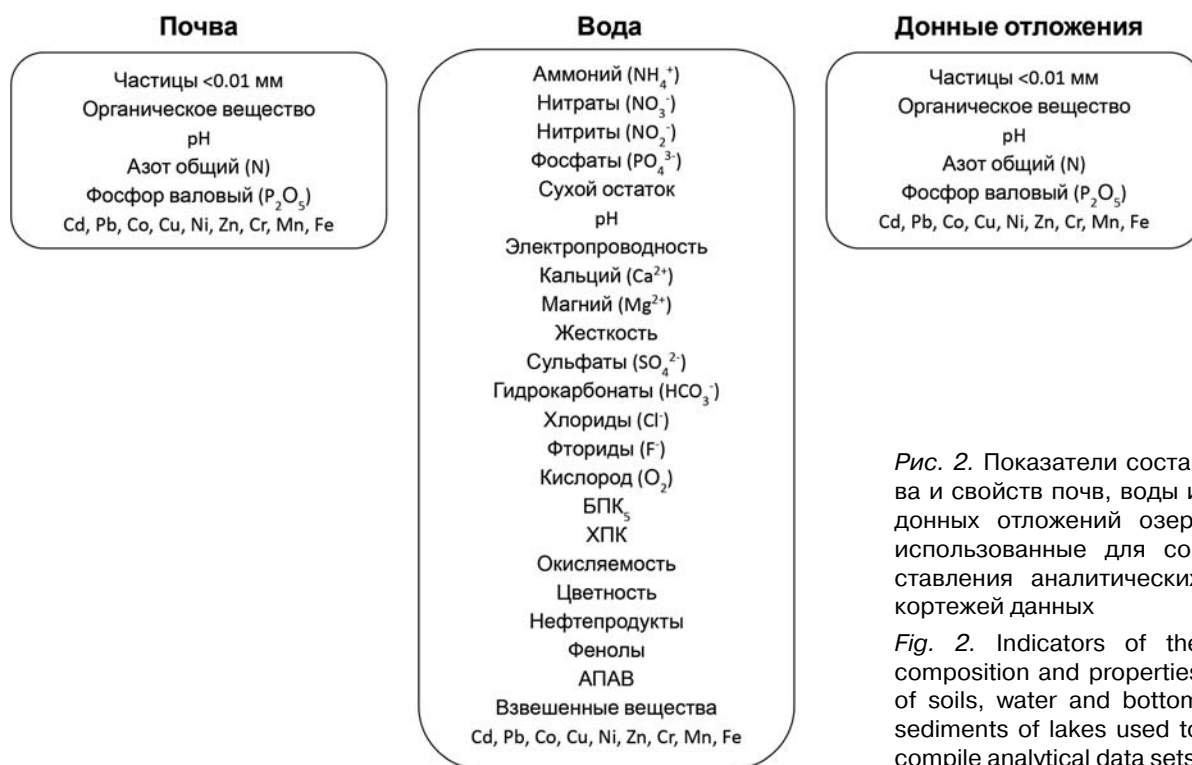


Рис. 2. Показатели состава и свойств почв, воды и донных отложений озер, использованные для составления аналитических кортежей данных

Fig. 2. Indicators of the composition and properties of soils, water and bottom sediments of lakes used to compile analytical data sets

Характеризуются средне- и тяжелосуглинстым гранулометрическим составом. Содержание гумуса варьирует от 4 до 6 %, реакция среды слабокислая.

Черноземы (оподзоленные, выщелоченные и типичные) – доминирующий тип почв в структуре почвенного покрова – распространены в Предволжье и Закамье. Формируются на элювиальных и делювиальных отложениях тяжелосуглинистого и глинистого гранулометрического состава. Мощность гумусового горизонта превышает 40 см. Содержание гумуса – 6 % и выше; реакция среды близкая к нейтральной, слабокислая (у оподзоленных и выщелоченных черноземов).

По химическому составу среди исследованных водных объектов преобладают озера с минерализацией от 38 до 624 мг/дм³ и гидрокарбонатно-кальциевым типом вод, на втором месте по распространенности – гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевые воды. Содержание в воде (мг/дм³) гидрокарбонат-ионов варьирует от 9 до 389, сульфатов – от 1 до 298, кальция – от 5 до 97, магния от 0,2 до 69. Диапазон изменения реакции среды также достаточно широк: от 6,2 до 9,5 ед. pH. Ниже приведены диапазоны варьирования ключевых, в контексте решаемых задач, измеренных и расчетных гидрохимических показателей (мг/дм³): растворенный кислород 0,01–12,4;

БПК₅ 1,0–15,4, ХПК 6–104 (ХПК/БПК₅ 3–3); окисляемость 0,7–33,1; аммоний 0,07–8,75; нитриты 0–0,21, нитраты 0,01–54 (NH₄⁺/NO₃⁻ 0,002–41); фосфаты 0–3,5; железо 0,06–4,72; марганец 0,002–0,177.

Поверхностные слои донных отложений исследуемых озер представлены различными минеральными типами: песками (1 %), илистыми песками (20 %), песчанистыми (41 %) и глинистыми илами (38 %). Содержание органического вещества в них варьирует от 0,1 до 22,5 % (при среднем значении 4,2 %), плотность сложения – от 0,1 до 1,6 г/см³ (средн. 0,5 г/см³). Для Предкамья и Предволжья характерно относительное накопление частиц пелитовой (глинистой) размерности в донных отложениях в сравнении с их содержанием в почвах водосборных бассейнов. Эта разница достигает 12–16 % и обусловлена поверхностным стоком в водоемы частиц с наименьшей гидравлической крупностью. В Закамье эти различия нивелированы в силу того, что в выборке представлены в основном озера, где аллохтонный привнос слабовыражен.

Результаты статистической обработки данных, характеризующих средние показатели гранулометрического состава, содержания органического вещества, азота и фосфора, реакцию среды донных отложений озер и почв их водосборных бассейнов, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Средние показатели состава и свойства почв водосборных территорий (числитель) и донных отложений озер (знаменатель), $M \pm m$

Table 1. Average indicators of the composition and properties of soils of catchment areas (numerator) and bottom sediments of lakes (denominator), $M \pm m$

Регион Region	<0,01 мм, %	Орг. в-во, % Org. matter, %	Азот, % Nitrogen, %	Фосфор, % Phosphorus, %	pH
Предволжье Pre-Volga region	$42,1 \pm 3,8$ 58,6 ± 6,1	$5,8 \pm 0,4$ 7,2 ± 0,7	$0,28 \pm 0,05$ 0,38 ± 0,06	$0,14 \pm 0,01$ 0,28 ± 0,03	$6,9 \pm 0,3$ 6,4 ± 0,2
Предкамье Pre-Kama region	$27,5 \pm 1,6$ 39,9 ± 4,2	$3,6 \pm 0,2$ 4,0 ± 0,5	$0,14 \pm 0,01$ 0,28 ± 0,04	$0,11 \pm 0,01$ 0,15 ± 0,02	$6,3 \pm 0,1$ 6,3 ± 0,1
Закамье Trans-Kama region	$32,7 \pm 4,5$ 30,0 ± 4,9	$4,9 \pm 0,8$ 6,1 ± 1,3	$0,20 \pm 0,03$ 0,29 ± 0,07	$0,17 \pm 0,03$ 0,30 ± 0,07	$6,8 \pm 0,3$ 6,5 ± 0,3

В озерах кроме аллохтонного привноса значимую роль начинает играть автохтонная составляющая, поэтому в донных отложениях в среднем аккумулируется на 10–20 % больше углерода, чем в почвах питающих их бассейнов. В поверхностных горизонтах отложений активно идут процессы диагенеза органического вещества, поэтому со временем его концентрации могут достигать значений, соответствующих уровню содержания в гумусовых горизонтах почв.

Для азота и фосфора также характерно относительное накопление в донных отложениях. При этом оно более контрастно, чем у органического вещества, что указывает на потоки минеральных форм соединений биогенных элементов, формируемые диффузным поверхностным и внутрпочвенным стоком, а для карстовых озер – подземными водами.

Кислотно-щелочные условия, которые формируются в почвах и донных отложениях озер, расположенных в различных физико-географических регионах, также имеют заметные отличия (табл. 1). В величину реакции среды донных отложений зональные условия вносят существенно меньший вклад, чем у почв. По этой причине показатели кислотности донных отложений не показывают большого разброса значений.

Окислительно-восстановительный потенциал донных отложений – один из ключевых факторов, регулирующих внутриводоемные геохимические процессы, которые в конечном итоге определяют качество воды, ее эвтрофирующий и токсический потенциал. Известно, что растворимость марганца, железа, фосфатов, процессы нитрификации и денитрификации управляются окислительно-восстановительными условиями на границе раздела фаз «вода – донные отложения», которые, в свою очередь, определяются доступностью кислорода и легкоокисляемого органического вещества.

При этом в придонном горизонте вод азотный цикл выступает в роли редокс-индикатора, отражающего состояние всей каскадной системы анаэробных процессов, включая критически важную ремобилизацию железа, фосфора и ряда металлов из донных отложений. В частности, соотношение аммония и нитратов ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) отражает установившееся равновесие окислительно-восстановительного состояния, являясь прямым следствием микробной сукцессии: оно фиксирует анаэробность условий, а также активность и фазы их формирования [Бикбулатов, 2009]:

Фаза 0. Аэробные условия (норма)

Растворенный кислород: в достатке.

Азотный цикл: доминирует нитрификация $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ (бактерии *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*).

Железо и марганец: присутствуют в виде нерастворимых оксидов/гидроксидов (Fe^{3+} , Mn^{4+}) на поверхности тонкодисперсных частиц донных отложений. Фосфаты (PO_4^{3-}) прочно сорбированы на этих оксидах.

Соотношение $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$: низкое ($\ll 1$).

Фаза 1. Нарастание гипоксии (концентрация $\text{O}_2 < 2 \text{ мг/л}$)

Растворенный кислород: концентрация становится лимитирующим фактором.

Азотный цикл: нитрификация тормозится первой, так как нитрификаторы – строгие аэробы. Скорость поступления NH_4^+ из разлагающейся органики начинает превышать скорость его окисления. Денитрификация (восстановление NO_3^-) может идти в микрониахах.

Железо и марганец: начало микробной редукции лабильных оксидов Mn (IV) и Fe (III). Марганец восстанавливается раньше железа (при более высоком редокс-потенциале).

Фосфаты: десорбция с восстанавливающимися оксидами Mn.

Соотношение $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$: растёт (≥ 1).

Фаза 2. Устойчивая анаэробность ($O_2 \rightarrow 0$)

Растворенный кислород: отсутствует.

Азотный цикл: нитрификация полностью остановлена; накопленные нитраты в ходе денитрификации превращаются в газообразный азот. Аммоний становится конечным продуктом разложения органики в анаэробных условиях (аммонификаторы, сульфатредукторы). NH_4^+ накапливается, NO_3^- исчезает.

Железо и марганец: в результате активно идущих процессов Fe- и Mn-редукции в воду поступают ионы Fe^{2+} и Mn^{2+} .

Фосфаты: массовое растворение оксидов железа приводит к лавинообразному выбросу сорбированных фосфатов в воду. Рост внутренней биогенной нагрузки.

Соотношение NH_4^+/NO_3^- : очень высокое (> 10).

Фаза 3. Глубокая сульфатредукция (при наличии SO_4^{2-})

После истощения запасов оксидов Fe и Mn начинается восстановление сульфатов до сероводорода с участием сульфатредуцирующих бактерий. H_2S связывает Fe^{2+} , образуя нерастворимый гидротроилит ($FeS \cdot nH_2O$). Условия среды – сверхвосстановительные.

Процессы разложения легкоокисляемого органического вещества в донных отложениях в анаэробных условиях приводят к накоплению NH_4^+ и одновременно служат донором электронов для бактерий – редукторов железа и марганца [Заdereев и др., 2014]. Процессы идут в строгой последовательности по мере падения Eh (от окисления к восстановлению): аэробная зона (нитрификация) → анаэробная зона (денитрификация) → восстановление Mn (IV) → восстановление Fe (III) → сульфатредукция → метаногенез [Cangemi et al., 2010; Рубан и др., 2021].

В связи с тем, что показатели БПК₅ и ХПК отражают наличие в воде разного по биодоступности растворенного органического вещества (лабильное и рефрактерное), их соотношение (ХПК/БПК₅) предоставляет прямую информацию о его качестве и подвижности (доступности), выделяя долю трудноразлагаемой органики, что напрямую связано с процессами на границе «вода – донные отложения». Высокое значение этого соотношения (6–10 и выше) указывает на доминирование рефрактерного (устойчивого) органического вещества, что особенно характерно для гумифицированного вещества почвенного стока. Такое органическое вещество меньше влияет на быстрый расход O_2 , но может активно связывать металлы (особенно Cu, Pb, Co, Cr) за счет хелатных свойств гуминовых

веществ [Лапин, Красюков, 1986; Линник и др., 2005].

Таким образом, можно выделить два основных контура регулирования особенностей протекания окислительно-восстановительных реакций в донных отложениях:

- 1) динамический редоксный контур;
- 2) стабилизирующий сорбционный контур.

Редоксный контур обусловлен поступлением в донные отложения и последующим разложением лабильного, легкоокисляемого органического вещества за счет активного микробного дыхания: быстрое истощение $O_2 \rightarrow$ аноксия → совместное восстановление и растворение Fe-Mn-оксидов и связанных с ними P, Zn, Cu → вынос элементов в воду.

Сорбционный контур обусловлен накоплением в донных отложениях рефрактерного, гумифицированного органического вещества, как правило, терригенного происхождения, и сопровождается сорбцией и хелатированием катионов металлов (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+}) гуминовыми веществами с образованием прочных, малорастворимых комплексов, а также накоплением Mn^{4+} в устойчивых оксидах.

На описанные выше фазы окислительно-восстановительных реакций и контуры их регулирования накладывается аллохтонное поступление в озера почвенного гумуса и тонкодисперсных частиц в результате поверхностного стока. Последние выступают в роли пассивной матрицы-носителя, аккумулирующей и консервирующей продукты реакций обоих контуров. Таким образом, часто констатируемая связь матрицы (размерности частиц отложений) с содержанием органического вещества, биогенных элементов, металлов в донных отложениях является в первую очередь следствием сорбции. Если принять, что редоксный контур – это основной драйвер, переводящий систему из одной фазы окислительно-восстановительных условий в другую, то сорбционный контур обеспечивает буферность и модификацию процессов, определяющих интенсивность и длительность фаз, при этом тонкодисперсные частицы ($< 0,01$ мм) формируют фоновую матрицу для реализации описываемых процессов.

Таким образом, дисперсное и гумусное состояние почв водосборных территорий является основным фактором, управляющим направлением и интенсивностью окислительно-восстановительных процессов, происходящих на границе фаз «вода – донные отложения» и обуславливающих в конечном итоге формирование фоновых гидрохимических характеристик озер при отсутствии прямого антропогенного воздействия.

Проведенный статистический анализ позволил верифицировать описанные выше закономерности на фактическом материале.

Так, при высоких значениях молярного отношения Fe/P в донных отложениях и $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ в воде исследуемых озер отмечена положительная корреляционная взаимосвязь между концентрациями железа и фосфатов в воде ($r = 0,47$; $p < 0,01$). Это указывает на то, что основным источником PO_4^{3-} в водных массах является не равновесная десорбция, а растворение железо-фосфатных агрегатов.

При высоком отношении Fe/P в осадках сохранился запас фосфора, который надежно связан гидроксидами железа, однако при наступлении аноксии (на что указывает расширенное отношение $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) происходит их совместное восстановление и растворение. Железо (Fe^{2+}) и фосфор (PO_4^{3-}) высвобождаются в воду одновременно и в пропорциях, определяемых вещественным составом минеральной фазы отложений.

В отложениях с низким значением Fe/P запас фосфора в железо-оксидной фазе незначителен. Тем не менее фосфор может поступать в воду и из других источников (разложение органического вещества, десорбция с CaCO_3 , диффузия из глубоких слоев отложений) [Мартынова, 2010], не связанных напрямую с железом, поэтому корреляция с ним отсутствует.

Высокие значения ХПК/БПК₅ – маркер рефрактерного, гумифицированного органического вещества, которое накапливается в донных отложениях. Значения ХПК/БПК₅ прямо коррелируют с органическим веществом донных отложений озер ($r = 0,36$; $p < 0,001$) и обратно ($p < 0,05$) – с концентрацией Cd ($r = -0,27$), Cu ($r = -0,22$) и Cr ($r = -0,37$) в воде. Обратная корреляционная взаимосвязь с металлами в воде является свидетельством сорбционно-иммобилизирующей роли гумифицированного органического вещества отложений. Гуминовые кислоты обладают высокой хелатирующей способностью, особенно по отношению к катионам Cu^{2+} , Cr^{3+} , Cd^{2+} . Они прочно удерживают их в донных отложениях, предотвращая ремобилизацию в воду.

Значения перманганатной окисляемости прямо и статистически значимо ($p < 0,01$) коррелировали с концентрацией фосфатов в воде ($r = 0,51$), с редокс-металлами Fe и Mn ($r = 0,29$ и $0,49$ соответственно), с редокс-индикатором $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ($r = 0,39$) и с органическим веществом донных отложений ($r = 0,42$). Таким образом, перманганатная окисляемость ведет себя не как классический индикатор

легкоокисляемой органики, а как интегральный показатель «редокс-лабильного пула». По всей видимости, она отражает окисление не только органического вещества, но и закисных форм железа и марганца (Fe^{2+} , Mn^{2+}), которые в избытке появляются в воде при аноксии.

Следует особо отметить, что содержание исследованных металлов в почвах прямо коррелирует с содержанием в них частиц $< 0,01$ мм ($r = 0,31-0,85$; $p < 0,01$), при этом тонкодисперсная фракция связана с содержанием гумуса ($r = 0,78$). Отмечены следующие важные, статистически подтвержденные корреляции содержания в почвах гумуса с величиной pH донных отложений ($r = 0,35$; $p < 0,01$), БПК₅ ($r = -0,31$; $p < 0,01$), концентрациями нитратов ($r = 0,43$; $p < 0,001$), Fe ($r = -0,33$; $p < 0,05$) и Cu ($r = -0,21$; $p < 0,01$) в воде. С содержанием Cd, Pb, Ni, Co и Zn в воде также отмечены отрицательные взаимосвязи, однако статистически не подтвержденные ($p > 0,05$).

Общий азот почв прямо коррелирует с органическим веществом ($r = 0,31$) и азотом ($r = 0,27$) донных отложений, концентрацией нитрат-ионов в воде ($r = 0,31$; $p < 0,01$), а содержание частиц $< 0,01$ мм – с аналогичным показателем донных отложений ($r = 0,34$; $p < 0,001$).

Содержание частиц $< 0,01$ мм в поверхностном слое донных отложений озер определяет только вариации анализируемых показателей самих осадков (органическое вещество, азот, фосфор, металлы), а с сопряженными гидрохимическими показателями (ХПК, БПК₅, минеральные формы азота, фосфаты, растворенные формы металлов) статистически значимых корреляций отмечено не было ($p > 0,05$). Следовательно, можно предположить, что гидрохимический режим водных масс озер определяется не столько уровнями накопления тех или иных химических веществ в донных отложениях, сколько природой и составом органического вещества в поверхностном их слое.

Таким образом, результаты статистического анализа указывают на то, что с водосбора в водный объект поступает полидисперсная, органо-минеральная матрица-носитель разнообразных элементов и соединений, геохимический, в том числе эвтрофирующий и токсический, потенциал которых при попадании в водную экосистему может быть реализован в различных направлениях в зависимости от редокс-условий, которые периодически формируются в водоеме на границе сред.

Причинно-следственные связи между уровнем содержания органического вещества в почвах и характером течения геохимических процессов в водных массах и донных отложениях

озер схематически можно представить следующим образом:

1) для бедных гумусом почв: усиленный вынос тонкодисперсного материала и растворимых (подвижных) форм элементов → инициация «редоксного контура» в озере лабильной органикой и металлами → высокий риск эвтрофикации и загрязнения;

2) для богатых гумусом почв: минимальный вынос, удержание загрязнителей → создание предпосылок для стабильности, доминирование «сорбционного» контура за счет поступления стабильного гумусового вещества → накопление металлов в донных отложениях и риск вторичного загрязнения.

Предлагаемая схема подтверждается результатами факторного анализа (табл. 2). В нем четко выделяются три фактора.

Фактор 1 (почвенный) объединяет переменные, характеризующие почвы водосбора: гумус, азот, частицы < 0,01 мм, металлы.

Фактор 2 (донные отложения) объединяет частицы < 0,01 мм и металлы в составе донных отложений. Это промежуточное звено, пассивный аккумулятор. Он сильно зависит от Фактора 1 (поступления с водосбора), но слабо связан с гидрохимическими показателями (Фактор 3), что подтверждает вывод о консервативной роли донных отложений.

Фактор 3 (водный) характеризует интегральный отклик системы и объединяет ключевые индикаторы активных процессов: перманганатная окисляемость (лабильный восстановленный пул), фосфаты (продукт ремобилизации), $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (редокс-индикатор), Mn (редокс-чувствительный металл). Ортогональность этого

Таблица 2. Результаты факторного анализа

Table 2. Results of factor analysis

Переменные Variables	Фактор 1 Factor 1	Фактор 2 Factor 2	Фактор 3 Factor 3
Почвы Soils			
Гумус Humus	<i>0,836</i>	0,018	-0,126
N	<i>0,744</i>	-0,063	0,045
<0,01 мм	<i>0,874</i>	0,157	-0,053
Pb	<i>0,773</i>	0,021	0,066
Co	<i>0,804</i>	0,085	0,119
Cu	<i>0,914</i>	0,074	-0,034
Ni	<i>0,863</i>	-0,016	-0,003
Zn	<i>0,821</i>	-0,005	-0,038
Cr	<i>0,944</i>	0,113	0,076
Fe	<i>0,808</i>	0,087	0,091
Донные отложения Bottom sediments			
<0,01 мм	0,260	<i>0,809</i>	-0,003
Co	0,061	<i>0,833</i>	-0,035
Cu	0,078	<i>0,907</i>	0,028
Ni	0,231	<i>0,862</i>	-0,082
Zn	-0,307	<i>0,711</i>	0,103
Cr	-0,009	<i>0,890</i>	-0,086
Fe	-0,033	<i>0,760</i>	0,008
Вода Water			
Окисляемость перманганатная Permanganate oxidizability	-0,031	-0,042	<i>0,755</i>
Фосфаты Phosphates	-0,001	0,025	<i>0,841</i>
Mn	0,092	-0,073	<i>0,868</i>
$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	-0,019	-0,017	<i>0,721</i>

Примечание. Курсивом выделены переменные с наибольшими факторными нагрузками.

Note. Variables with the highest factor loadings are given in italics.

фактора позволяет утверждать, что текущее качество воды определяется не общим запасом веществ в донных отложениях, а активными процессами на границе раздела.

Геохимическое состояние практически любого пресноводного водного объекта (в нашем случае – озера) является отображением двух параллельно идущих в его экосистеме процессов:

1) долгосрочного, консервативного процесса (Факторы 1 и 2), который обеспечивается выносом почвенного материала, седиментацией взвешенных частиц и накоплением донных отложений, где направление и скорость химических процессов зависят от стабилизирующей роли почвенного гумуса;

2) кратковременного, динамического процесса (Фактор 3), который является следствием внутриводоемных биогеохимических процессов (химических реакций) на границе «вода – осадок», управляемых окислительно-восстановительными условиями и лабильной органикой.

Почвенный гумус выступает здесь в роли основного триггера переключения состояния: с одной стороны, он ограничивает поступление лабильных загрязнителей, ослабляя «редоксный контур», а с другой – поставляет стабильный органический материал, питая «сорбционный» контур в самом озере.

Наложение контуров регуляции окислительно-восстановительных условий на фазы трансформации соединений азота позволяет выделить четко разделяемые геохимические условия (зоны), формирующиеся на границе фаз «вода – донные отложения».

Зона 0. Аэробные условия (сорбционный контур)

Редоксный контур подавлен, доминирует сорбционный контур, стабилизирующий систему. Лабильная органика (низкое отношение $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) быстро окисляется, не успевая создать дефицит O_2 . Гуминовые вещества придонных вод (высокое отношение ХПК/БПК₅) прочно хелатируют и удерживают металлы (Cu, Pb, Cd) в осадке. Оксиды Fe и Mn, стабилизированные в окислительной среде, эффективно сорбируют фосфаты. Поддерживается высокий редокс-потенциал, фракция < 0,01 мм является основной матрицей для накопления и стабилизации Fe-Mn-оксидов и гуминовых комплексов. Гидрохимическими признаками зоны являются высокая концентрация O_2 (выше медианного уровня всех наблюдений), низкое отношение $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (ниже медианы), низкая перманганатная окисляемость (ниже медианы), высокое отношение ХПК/БПК₅ (выше медианы).

Зона 1. Нарастание гипоксии (триггер перехода)

Редоксный контур активируется и становится доминирующим процессом. Поступление и накопление лабильной органики постепенно приводит к росту БПК₅ и падению концентрации O_2 . Падение O_2 инициирует восстановление Fe-Mn-оксидов. Гуминовые вещества пока устойчивы, но их буферная роль ослабевает. В этих условиях частицы < 0,01 мм начинают играть не только депонирующую роль, но и роль источника для ремобилизации, так как с их поверхности начинают десорбироваться фосфаты и восстанавливаться Mn. Гидрохимическими признаками зоны являются низкая концентрация O_2 (ниже медианного уровня), низкое отношение $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (ниже медианы), высокая перманганатная окисляемость (выше медианы), высокая концентрация фосфатов (выше медианы).

Зона 2. Устойчивая анаэробность (редоксный контур)

Редоксный контур доминирует, а сорбционный подавлен и трансформируется. Продукты разложения лабильного органического вещества (NH_4^+) и сопутствующей этому редукции (Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-}) определяют трансформацию химического состава вод. Некоторые гуминовые комплексы в восстановительных условиях начинают разрушаться и превращаются во вторичный источник металлов при изменении pH или редокс-потенциала. Тем не менее большая часть рефрактерного органического вещества сохраняется, выступая в роли инертной матрицы. Частицы < 0,01 мм в таких условиях активно отдают накопленные P, Fe, Mn в воду через процесс восстановления. Их связь с трансформацией химического состава воды становится прямой и негативной (источник загрязнения). Гидрохимическими признаками зоны являются низкая концентрация O_2 (ниже медианного уровня), высокое отношение $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (выше медианы), низкое отношение ХПК/БПК₅ (ниже медианы) при высоком значении БПК₅ (выше медианы), высокая перманганатная окисляемость, высокие концентрации фосфатов (PO_4^{3-}), железа (Fe^{2+}) и марганца (Mn^{2+}) (все выше медианы).

Зона 3. Глубокая сульфатредукция

Редоксный контур достигает максимального развития. Истощив энергетически более выгодные акцепторы (O_2 , NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+}), он переключается на сульфаты. В результате образующийся сероводород (H_2S) осаждает металлы в виде сульфидов (FeS , CuS), что формирует новую форму их иммобилизации, конкурирующую с гуминовой. Возникает химическая конкуренция между сульфидным и органическим

связыванием металлов, и фракция < 0,01 мм в этих условиях становится средой для диагнеза, сорбционный контур перезапускается в новой форме. Гидрохимическими признаками зоны являются отсутствие кислорода ($O_2 \rightarrow 0$), низкие значения железа (Fe^{2+}) и фосфатов (ниже медианы).

При самых низких значениях редокс-потенциала ($Eh < -200$ мВ) в условиях полного отсутствия O_2 , NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} и истощения сульфатов получают преимущество строго анаэробные археи-метаногены, использующие в качестве источника энергии простейшие соединения (водород, углекислоту, ацетат). Метаногенез реализуется различными путями: через реакции ацетогенеза Вуда – Люнгдаля [Ragsdale, 2008], водородотрофным (автотрофным) и метилтрофным способом [Lupa et al., 2008; Watkins et al., 2014]. Метаногенез – это завершающий, терминальный этап редоксного контура, реализующийся в условиях очень низких значений отношения ХПК/БПК₅ и высоких значений перманганатной окисляемости (крайне восстановительные условия). Однако в зонах с выраженным сорбционным контуром и, как следствие, потенциально высоким содержанием сульфатов (например, из-за разложения органики, содержащей серу), метаногенез будет подавлен. Зоны с высоким отношением ХПК/БПК₅ и высокой концентрацией сульфатов в воде, высоким содержанием органического вещества природного и техногенного генезиса в донных отложениях исключают появление очагов активного метаногенеза. Высокая доля пелитовой фракции является признаком потенциального метаногенеза, так как при этом реализуется вертикальный градиент процессов: у поверхности донных отложений может идти сульфатредукция, а на глубине 10–50 см, где сульфаты исчерпаны, начинается активный метаногенез [Hu et al., 2015; Гарькуша, Федоров, 2022].

Таким образом, двухконтурная схема, дополненная фазовой моделью азотного цикла, позволяет объяснить, почему в одних геохимических условиях (зонах) водная экосистема легко скатывается в аноксию (преобладание лабильной органики и редокс-контур), а в других – устойчиво сохраняет окислительные условия (доминирование гумусового сорбционного контура).

Цикличность и пространственная мозаика функционирования двухконтурной схемы обусловлена, с одной стороны, сезонными изменениями: окислительно-восстановительные условия в водоемах могут колебаться между фазой 0 (или 1) (весна/осень, перемешивание)

и фазой 2 (или 3) (лето/зима, стратификация), при этом сорбционный контур стабилизирует систему в окислительных фазах, а редоксный нарушает эту стабильность в восстановительных. С другой стороны, пространственной неоднородностью условий в водоемах с глубоководными гипolimническими ямами может устанавливаться фаза 2 (или 3) (доминирует редокс-контур), а в мелководных водоемах, где нет устойчивой стратификации, может сохраняться фаза 0 с доминированием сорбционного контура. Активная роль фракции < 0,01 мм на глубоководных участках акватории озер (фазы 1–3) сменяется ролью пассивного геохимического архива на мелководьях (фаза 0).

Используя гидрохимические признаки выделенных зон, мы построили дерево условий, по которому осуществлялось кодирование каждого наблюдения по порядковому номеру соответствующей этому наблюдению зоны {0,1,2,3}. Дискриминантный анализ показал хорошую степень разделения наблюдений при использовании дерева гидрохимических условий (рис. 3).

С целью перехода от диагностики следствия (гидрохимический состав вод) к прогнозу по причинам и условиям (почва, донные отложения), а также проверки и формализации гипотезы о том, что состояние водных экосистем определяется характеристиками их водосборов и накопленными донными отложениями, нами была построена ML-модель взаимосвязи, где предикторами являлись характеристики почв (содержание органического вещества, массовая доля азота, содержание частиц < 0,01 мм), донных отложений (органическое вещество, содержание частиц < 0,01 мм) и такой морфометрический признак, как глубина в точке отбора пробы, а в качестве целевой переменной – выделенная по гидрохимическим признакам зона.

В качестве метода ML-моделирования использовался устойчивый к переобучению на малых выборках метод Random Forest [Летова, 2017; Осколков и др., 2017].

Гиперпараметры модели подбирались методом Grid Search по сетке их возможных значений, оценка обобщающей способности модели осуществлялась методом K-блочной кросс-валидации (K-Fold CV) с использованием 5 блоков и расчетом разброса среднеквадратичной ошибки (MSE). В связи с тем, что значения классифицирующих меток (целевой переменной) не произвольны, а имеют направленность (от 0 к 3), использован как классифицирующий, так и регрессионный вариант моделирования. Выборка данных разделялась на обучающую и тестовую в соотношении 90 и 10 %.

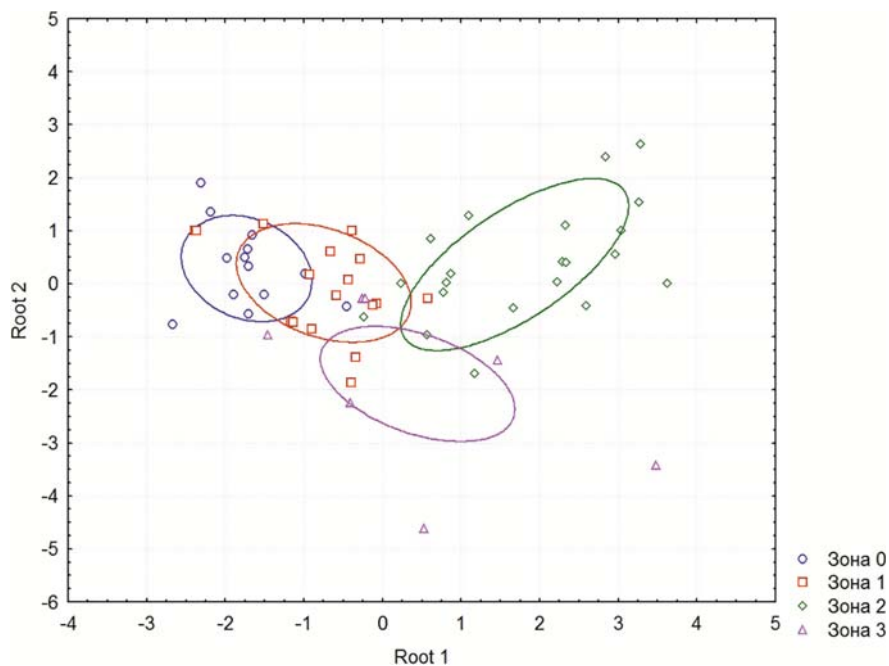


Рис. 3. Дискриминирование геохимических условий донных отложений (зон) по совокупности выделенных гидрохимических признаков

Fig. 3. Discrimination of geochemical conditions of bottom sediments (zones) based on a set of identified hydrochemical features

Важность показателя оценивалась пермутационным способом как разница между значениями MSE модели до и после перемешивания значений показателя. Оценка важности показателей позволила сократить число предикторов до 4 по убыванию важности: содержание органического вещества в донных отложениях, содержание частиц < 0,01 мм в почвах, содержание азота в почвах, содержание частиц < 0,01 мм в донных отложениях.

Особую роль здесь играют два противоположно направленных процесса: рост содержания органического вещества в донных отложениях увеличивает редокс-зону ($r = 0,34$, $p < 0,01$), а повышение количества частиц < 0,01 мм в почве снижает ее ($r = -0,31$, $p < 0,01$).

Лучшие параметры модели Random Forest для регрессии: {'max_depth': 15, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 100}; для классификации: {'class_weight': 'balanced', 'max_depth': 15, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 100}. Качество регрессионной модели оценивалось по значению коэффициента детерминации (R^2) и средней абсолютной ошибке (MAE), качество классификации – по доле правильных прогнозов (accuracy и F1-score).

В результате и регрессионная, и классифицирующая модели продемонстрировали на тестовой выборке хороший результат.

Регрессионная модель: MAE = 0,13, $R^2 = 0,91$; классифицирующая модель: accuracy = 0,894, F1-score = 0,889. Верификацию моделей осуществляли на 15 наблюдениях, не вошедших в обучающую выборку (рис. 4).

Регрессионная модель позволяет количественно оценить потенциал развития редокс-зоны по легко определяемым консервативным параметрам, а классификационная модель с высокой достоверностью относит водоем к одному из диагностированных состояний (от аэробного до сульфатредуцирующего) на основе данных по характеристикам почв и донных отложений. Успешная верификация на независимой выборке подтвердила робастность моделей и их применимость для диагностики водных объектов.

Заключение

Настоящее исследование позволило разработать и количественно обосновать модель двухконтурной регуляции окислительно-восстановительного режима озерной экосистемы, связывающую почвенные характеристики водосбора, состав донных отложений и гидрохимические характеристики водных масс.

Методы машинного обучения (Random Forest) выявили, что состояние системы с высокой точностью предсказывается всего четырьмя

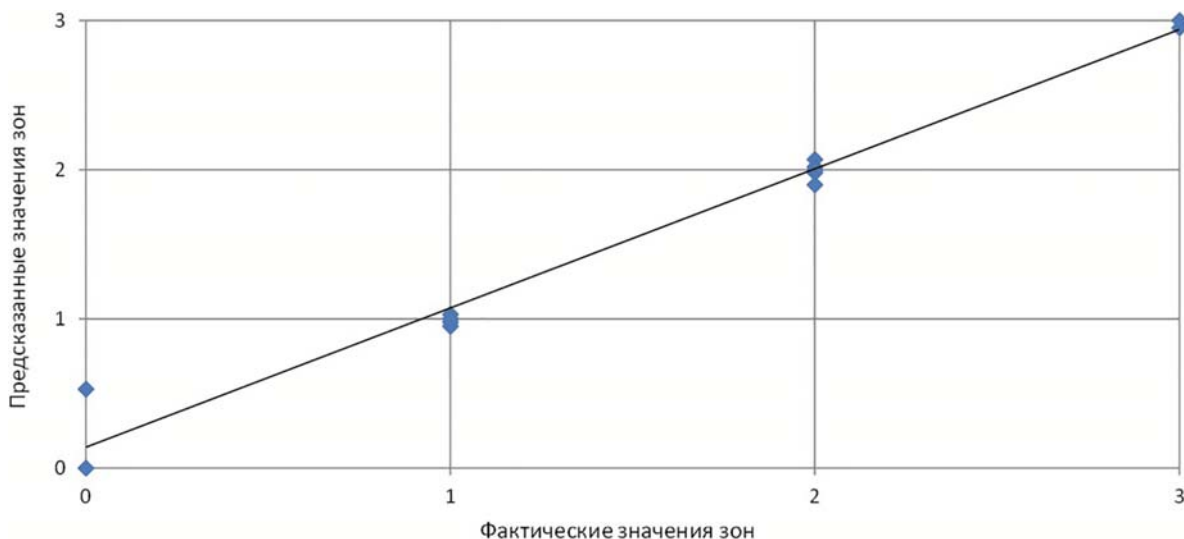


Рис. 4. Сопоставление предсказанных и реальных значений редокс-зон (регрессия) по верифицирующей выборке значений, не используемых в обучении модели

Fig. 4. Comparison of the predicted and actual values of redox zones (regression) based on a verification sample of values not used in model training

стабильными параметрами, образующими два противоположно направленных вектора влияния. Вектор активации редокс-контура формируется за счет роста содержания органического вещества в поверхностном слое донных отложений, которое является ведущим предиктором формирования обширных аноксических зон, что указывает на центральную роль накопленной автохтонной и аллохтонной органики как источника для процессов микробного дыхания и последующей редукции оксидов. Вектор стабилизации (сорбционный барьер) обусловлен ростом содержания тонкодисперсных фракций в почвах водосбора, которые выступают фактором, снижающим вероятность и выраженность аноксических условий. Это подтверждает роль почвенного гумусово-глинистого комплекса как геохимического барьера, ограничивающего вынос лабильных форм химических элементов и модулирующего поступление материала в водоем. Важная роль в модели двух показателей – содержания азота в почвах и фракции < 0,01 мм в донных отложениях – подчеркивает необходимость учета полного пути миграции вещества от его источника на водосборе до конечного аккумулятора.

Полученные результаты предлагают статистическое обоснование роли почв как регулятора внутриводоемных процессов. Экосистема озера предстает не как изолированный объект, а как интегратор ландшафтно-геохимических процессов своего водосбора, где

баланс между двумя векторами – активации и стабилизации – определяет ее устойчивость.

В прикладном аспекте разработанный метод открывает путь к превентивному выявлению и картографированию зон риска эвтрофирования и загрязнения водоемов тяжелыми металлами. Мониторинг и управление, таким образом, могут быть смещены со стандартно применяемого реактивного контроля гидрохимических показателей на проактивное управление факторами водосбора (например, на сохранение и увеличение пула почвенного органического вещества, противодействие эрозии) и учет геохимического потенциала донных отложений.

Таким образом, полученные результаты помогают перевести понимание механизмов действия внутренней химической нагрузки на водоем из области качественных описаний в область количественного прогнозирования. Установленная взаимосвязь «почва → донные отложения → окислительно-восстановительный режим воды» формирует научную основу для разработки территориальных схем охраны водных объектов, где меры на водосборе становятся главным инструментом обеспечения экологической устойчивости водной экосистемы. Описанная в работе методология позволяет моделировать возможные состояния системы «почвы водосбора – донные отложения – вода», прогнозируя типичное или наиболее вероятное его геохимическое состояние в условиях, способствующих стратификации/аноксии.

Литература

Бикбулатов Э. С. Биоэлементы и их трансформация в водных экосистемах. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2009. 289 с.

Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А. Метан и сероводород в донных отложениях водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 45–61. doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-45-61

Заdereев Е. С., Толмеев А. П., Дроботов А. В., Колмакова А. А. Влияние погодных условий на пространственную и сезонную динамику растворенных и взвешенных биогенных элементов в водной толще меромиктического озера Ширы // Сибирский экологический журнал. 2014. Т. 21, № 4. С. 515–530.

Лапин И. А., Красюков В. Н. Роль гумусовых веществ в процессах комплексообразования и миграции металлов в природных водах // Водные ресурсы. 1986. № 1. С. 134–144.

Летова М. С. Реализация регрессионных и классификационных задач с помощью метода Random Forest // E-Scio. 2017. № 8. С. 15–21.

Линник П. Н., Зубко А. В., Зубенко И. Б., Малиновская Л. А. Адсорбция тяжелых металлов донными отложениями в присутствии гумусовых веществ // Гидробиологический журнал. 2005. Т. 41, № 3. С. 104–119.

Мартынова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 243 с.

Осколков В. М., Шаханов Н. И., Варфоломеев И. А., Юдина О. В., Виноградова Л. Н., Ершов Е. В. Применение параллельных вычислений для прогнозирования на основе алгоритма машинного обучения Random Forest // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Распознавание – 2017): Сб. мат-лов XIII Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2017. С. 267–269.

Рубан А. С., Рудмин М. А., Мазуров А. К., Милевский Я. В., Семилетов И. П., Гершелис Е. В., Дударев О. В. Геохимические особенности донных осадков в области разгрузки метан-содержащих флюидов на внешнем шельфе моря Лаптевых // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 12. С. 76–89. doi: 10.18799/24131830/2021/12/3374

Cangemi M., Di Leonardo R., Bellanca A., Cundy A., Neri R., Angelone M. Geochemistry and mineralogy of sediments and authigenic carbonates from the Malta Plateau, Strait of Sicily (Central Mediterranean): relationships with mud/fluid release from a mud volcano system // Chem. Geol. 2010. Vol. 276. P. 294–308. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.06.014

Hu Y., Feng D., Liang Q., Xia Z., Chen L., Chen D. Impact of anaerobic oxidation of methane on the geochemical cycle of redox-sensitive elements at cold-seep sites of the northern South China Sea // Deep-Sea Research II. 2015. Vol. 122. P. 84–94. doi: 10.1016/j.dsr2.2015.06.012

Lupa B., Hendrickson E. L., Leigh J. A., Whitman W. B. Formate-dependent H₂ production by the mesophilic methanogen *Methanococcus maripaludis* // Appl. Environ. Microbiol. 2008. Vol. 74, no. 21. P. 6584–6590. doi: 10.1128/AEM.01455-08

Ragsdale S. W. Enzymology of the Wood-Ljungdahl pathway of acetogenesis // Annals of the New York Academy of Sciences. 2008. Vol. 1125. P. 129–136. doi: 10.1196/annals.1419.015

Redshaw C. J., Mason C. F., Hayes C. R., Roberts R. D. Factors, influencing phosphate exchange across the sediment-water interface of eutrophic reservoirs // Hydrobiologia. 1990. Vol. 192. P. 233–245.

Watkins A. J., Watkins A. J., Roussel E. G., Parkes R. J., Sass H. Glycine betaine as a direct substrate for methanogens (*Methanococoides* spp.) // Appl. Environ. Microbiol. 2014. Vol. 80, no. 1. P. 289–293. doi: 10.1128/AEM.03076-13

References

Bikbulatov E. S. Bioelements and their transformation in aquatic ecosystems. Rybinsk: Rybinskii dom pechati; 2009. 289 p. (In Russ.)

Cangemi M., Di Leonardo R., Bellanca A., Cundy A., Neri R., Angelone M. Geochemistry and mineralogy of sediments and authigenic carbonates from the Malta Plateau, Strait of Sicily (Central Mediterranean): relationships with mud/fluid release from a mud volcano system. *Chem. Geol.* 2010;276:294–308. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.06.014

Gar'kusha D. N., Fedorov Yu. A. Methane and hydrogen sulfide in bottom sediments of reservoirs and ponds of the Azov Sea basin. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki = Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences.* 2022;3:45–61. (In Russ.). doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-45-61

Hu Y., Feng D., Liang Q., Xia Z., Chen L., Chen D. Impact of anaerobic oxidation of methane on the geochemical cycle of redox-sensitive elements at cold-seep sites of the northern South China Sea. *Deep-Sea Research II.* 2015;122:84–94. doi: 10.1016/j.dsr2.2015.06.012

Лапин И. А., Красюков В. Н. Роль гумусовых веществ в процессах комплексообразования и миграции металлов в природных водах. *Vodnye resursy = Water resources.* 1986;1:134–144. (In Russ.)

Letova M. S. Implementation of regression and classification problems using the Random Forest method. *E-Scio.* 2017;8:15–21. (In Russ.)

Линник П. Н., Зубко А. В., Зубенко И. Б., Малиновская Л. А. Adsorption of heavy metals by bottom sediments in the presence of humic substances. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Hydrobiological Journal.* 2005;41(3):104–119. (In Russ.)

Lupa B., Hendrickson E. L., Leigh J. A., Whitman W. B. Formate-dependent H₂ production by the mesophilic methanogen *Methanococcus maripaludis*. *Appl. Environ. Microbiol.* 2008;74(21):6584–6590. doi: 10.1128/AEM.01455-08

Мартынова М. В. Bottom sediments as a component of limnic ecosystems. Moscow: Nauka; 2010. 243 p. (In Russ.)

Oskolkov V. M., Shakhanov N. I., Varfolomeev I. A., Yudina O. V., Vinogradova L. N., Ershov E. V. Application of parallel computing for forecasting based on the Random Forest machine learning algorithm. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenii i simvol'noi informatsii (Raspoznavanie – 2017): Sb. mat-lov XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Optical-electronic devices and instruments in image recognition systems, image and symbolic information processing (Recognition – 2017): Proceed. of the XIII int. scientific and technical conf. Kursk; 2017. P. 267–269.* (In Russ.)

Ragsdale S. W. Enzymology of the Wood-Ljungdahl pathway of acetogenesis. *Annals of the New York Academy of Sciences.* 2008;1125:129–136. doi: 10.1196/annals.1419.015

Redshaw C. J., Mason C. F., Hayes C. R., Roberts R. D. Factors, influencing phosphate exchange across the sediment-water interface of eutrophic reservoirs. *Hydrobiology.* 1990;192:233–245.

Ruban A. S., Rudmin M. A., Mazurov A. K., Milevskii Ya. V., Semiletov I. P., Gershelis E. V., Dudarev O. V. Geochemical features of bottom sediments in areas of methane-containing fluid discharge on the outer shelf of the Laptev Sea. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering.* 2021;332(12):76–89. (In Russ.). doi: 10.18799/24131830/2021/12/3374

Watkins A. J., Watkins A. J., Roussel E. G., Parkes R. J., Sass H. Glycine betaine as a direct substrate for methanogens (*Methanococoides* spp.). *Appl. Environ. Microbiol.* 2014;80(1):289–293. doi: 10.1128/AEM.03076-13

Zadereev E. S., Tolomeev A. P., Drobotov A. V., Kolmakova A. A. The influence of weather conditions on the spatial and seasonal dynamics of dissolved and suspended biogenic elements in the water column of meromictic Lake Shira. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Siberian Ecological Journal.* 2014;21(4):515–530. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 03.03.2026; принята к публикации / accepted: 11.03.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Валиев Всеволод Сергеевич

старший научный сотрудник

e-mail: podrost@mail.ru

Иванов Дмитрий Владимирович

д-р. геогр. наук, заместитель директора по научной работе

e-mail: water-rf@mail.ru

Александрова Асель Биляловна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: adabl@mail.ru

Зиганшин Ирек Ильгизарович

канд. геогр. наук, доцент, старший научный сотрудник

e-mail: Irek.Ziganshin@tatar.ru

Хасанов Рустам Равилевич

научный сотрудник

e-mail: rustamkhasanov88@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Valiev, Vsevolod

Senior Researcher

Ivanov, Dmitry

Dr. Sci. (Geog.), Deputy Director

Alexandrova, Asel

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Ziganshin, Irek

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor, Senior Researcher

Khasanov, Rustam

Researcher

УДК 574.5

МАКРОЗООБЕНТОС ГУБЫ МОЛОЧНОЙ (ОЗЕРО ИМАНДРА) ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ТОВАРНОЙ ФОРЕЛИ

Е. С. Савосин, Д. С. Савосин*

*Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *sadenser@inbox.ru*

Объектом данного исследования является озеро Имандра – крупнейший водоем Мурманской области. Водоем расположен в районе с развитой промышленностью и испытывает антропогенную нагрузку, выражающуюся в термофикации и биогенном загрязнении. Кроме того, значителен вклад поступления коммунально-бытовых вод крупных населенных пунктов, расположенных на территории его водосбора. Увеличение количества биогенных элементов в водной среде способно привести к эвтрофированию водоема в процессе антропогенной трансформации. В ходе исследования оценивалось экологическое состояние участка акватории губы Молочной озера Имандра по ряду показателей сообществ зообентоса, а также проводилось сравнение полученных данных с результатами предыдущих исследований. Анализ характеристик донного гидробиоценоза в зоне выращивания молоди форели выявил доминирование в водоеме комплекса *Oligochaeta+Chironomidae*, формирующих более 90 % биомассы и численности в пробе. Изучение современного состояния сообщества макрозообентоса губы проводилось с использованием общепринятых методов. Индекс видового разнообразия Шеннона – Уивера (H) для исследованного водоема варьировал от 1,14 до 1,42 и в среднем составил $1,32 \pm 0,16$, что свидетельствует о незначительном видовом обилии донных организмов и сложившейся структуре доминирующих таксонов. По уровню количественного развития зообентоса исследованный район акватории относится к α -мезотрофным, по индексу сапробности – к β -мезосапробным. Полученные результаты могут служить основой для комплексного экологического мониторинга водоемов Арктической зоны РФ с развитым форелеводством.

Ключевые слова: макрозообентос; Арктическая зона Российской Федерации; антропогенное воздействие; арктическая биота; аквакультура; биоразнообразие; биомониторинг; донные отложения; Имандра

Для цитирования: Савосин Е. С., Савосин Д. С. Макрозообентос губы Молочной (озеро Имандра) при выращивании товарной форели // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 79–88. doi: 10.17076/lim2220

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт биологии КарНЦ РАН, FMEN-2022-2007).

E. S. Savosin, D. S. Savosin*. MACROZOOBENTHOS OF MOLOCHNAYA BAY (LAKE IMANDRA) WITH COMMERCIAL TROUT FARMING

*Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *sadenser@inbox.ru*

The study focused on Lake Imandra – the largest body of water in the Murmansk Region. Situated in a heavily industrialized area, the lake experiences anthropogenic pressures, including thermal degradation and nutrient pollution. Furthermore, it receives significant amounts of municipal wastewater from large settlements within its catchment area. Increased nutrient levels in the aquatic environment can lead to eutrophication of the lake during its anthropogenic transformation. The aim of the study was to assess the ecological state of the Molochnaya Bay area of Lake Imandra using a number of zoobenthos community parameters, and to compare these data with the results of previous studies. Analysis of the characteristics of the benthic community in the juvenile trout rearing area revealed a dominance of the Oligochaeta + Chironomidae complex, which accounts for over 90% of the sample biomass and abundance. The current state of the bay's macrozoobenthos community was studied using commonly accepted methods. The Shannon-Weaver species diversity index (H) for the studied reservoir ranged from 1.14 to 1.42, averaging 1.32 ± 0.16 , indicating a low species abundance of benthic organisms and an established structure of dominant taxa. In terms of zoobenthos quantities, the studied area is classified as α -mesotrophic, and its saprobity index is β -mesosaprobic. These results can serve as a basis for integrated environmental monitoring of water bodies with active trout farming in the Arctic zone of the Russian Federation.

Keywords: macrozoobenthos; Arctic Zone of Russia; human impact; Arctic biota; aquaculture; biodiversity; biomonitoring; sediments; Imandra

For citation: Savosin E. S., Savosin D. S. Macrozoobenthos of Molochnaya Bay (Lake Imandra) with commercial trout farming. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 79–88. doi: 10.17076/lim2220

Funding. The study was financed from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (Institute of Biology KarRC RAS, FMEN-2022-2007).

Введение

В современный период многие водоемы подвержены влиянию антропогенных факторов (загрязнение среды на всех уровнях, накопление поллютантов, нарушение почвенно-растительного покрова, браконьерство, нерациональное использование биоресурсов, внедрение чужеродных видов) [Тишков, 2012]. Наблюдаемые изменения климата дополнительно усиливают негативные процессы, протекающие в водных экосистемах [Solomon et al., 2015; Roberts et al., 2017]. Оценка современного состояния всех элементов биоты, изучение видового состава, количественных характеристик биоценозов, в частности донной фауны, является актуальной задачей в решении проблемы сохранения биоразнообразия как важнейшего показателя состояния экосистемы [Sala et al., 2000; Arctic..., 2013; Culp et al., 2021].

Известно, что природа Крайнего Севера весьма уязвима к внешним воздействиям и обладает низким потенциалом самоочищения

[Моисеенко, Яковлев, 1990; Кашулин и др., 2019]. Эвтрофирование пресноводных и прибрежных морских экосистем в результате увеличения антропогенной нагрузки биогенными элементами в последние десятилетия стало глобальной проблемой и представляет серьезную угрозу устойчивости, экологической целостности и безопасному использованию внутренних и прибрежных вод [Моисеенко и др., 2009; Александров, 2010; Биота..., 2012].

Экологический мониторинг пресноводных водоемов требует надежных индикаторов, способных отражать долгосрочные изменения в экосистеме. Для комплексной оценки состояния водоемов исследователи используют биоиндикацию – метод, основанный на наблюдении за живыми организмами-маркерами. Одним из наиболее информативных объектов является бентос. Организмы донной фауны характеризуются широким экологическим спектром, достаточно крупными размерами, приуроченностью к конкретному местообитанию, значительной продолжительностью жизни,

позволяющей им аккумулировать загрязняющие вещества. Все это делает их очень удобным объектом для мониторинга пресноводных экосистем [Баканов, 2000; Яковлев, 2005].

Цель работы – оценка экологического состояния участка акватории губы Молочной озера Имандра по ряду показателей сообществ зообентоса и сравнение полученных данных с результатами предыдущих исследований.

Материалы и методы

Озеро Имандра – самый крупный водоем Кольского полуострова общей площадью 880,5 км². Оно характеризуется сложной лопастной формой с большим количеством заливов. Выделяют три в значительной степени обособленных плеса озера: Большая, Йокостровская и Бабинская Имандра.

Изучение зообентоса Мурманской области на примере крупных озер – Имандры и Умбозера началось в 1925–1930 гг. [Валькова и др., 2012], в дальнейшем эти работы носили эпизодический характер и выполнялись на отдельных плесах. Начиная с 1930-х годов в районе оз. Имандра происходит интенсивное строительство предприятий различных отраслей промышленности – горнодобывающей, химической, обогатительной, что привело к появлению новых городов, поселков и возрастанию численности населения – более 300 тыс. человек в настоящее время [Моисеенко и др., 2009; Кашулин и др., 2018а; Даувальтер и др., 2023]. Систематические гидробиологические исследования оз. Имандра получили развитие в конце 1980-х гг. на базе Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН) [Яковлев, 1984, 1998, 2005; Валькова, Кашулин, 2013].

Объектом исследования выбрана губа Молочная, входящая в состав Бабинской Имандры (южная часть водоема); в нее поступают подогретые сбросные воды Кольской АЭС, содержащие тяжелые металлы и ряд других химически активных веществ, а также биогены от функционирующей форелевой фермы [Анохина и др., 2016; Терентьева и др., 2017; Волкова, Хуобонен, 2019].

Изучение гидробиоценозов в губе Молочной оз. Имандра (рис. 1) проводилось в рамках комплексного исследования сотрудниками Института биологии КарНЦ РАН летом 2020 года при колебаниях температуры воды 18–23 °С. Для количественного отбора проб зообентоса в двух повторностях использовался дночерпатель Экмана-Берджа (площадь захвата 0,025 м²). Грунт промывался через сито

(размер ячеек 0,5 мм) и фиксировался в 8%-м растворе формалина [Абакумов, 1983]. Станции отбора проб (4) располагались в зоне постановки форелевых садков. Преобладающими типами грунта были илистые и илисто-песчаные. Всего в 2020 году отобрано 8 проб. Глубина варьировала от 3 до 5 м.

Камеральные процедуры проводились в лаборатории с использованием бинокулярного микроскопа Micromed MC-2-ZOOM, беспозвоночные сортировались по таксономическим группам и взвешивались на весах DA-124C (BEL Engineering) с точностью до 0,1 мг. Виды классифицировались в соответствии с последними рекомендациями [Timm, 2009; Определитель..., 2016] информационных порталов GBIF.org и Fauna Europea [De Jong et al., 2014]. Трофический статус водоема определялся по шкале С. П. Китаева [2007]. Для оценки видовой разнообразия на станциях с помощью программы PAST 3.18 рассчитывался индекс Шеннона (H) [Hammer et al., 2001; Magurran, 2013]. Кроме того, рассчитывался индекс сапробности (по методике Пантле и Букка в модификации Сладечека) с использованием индикаторных организмов макрозообентоса [Вшивкова и др., 2019]. Для оценки степени загрязнения вод Имандры использовался хирономидный индекс (K), предложенный Е. В. Балушкиной [1997].

Полученные данные сравнивали с результатами более ранних исследований на основе архивных данных (около 50 проб) ИППЭС КНЦ РАН.

Результаты

В ходе исследования в донном сообществе отмечены 15 таксонов надвидового и видового ранга водных беспозвоночных. Из них Oligochaeta – 3, Chironomidae – 10 (табл. 1).

Доминирующий комплекс зообентоса формируют Chironomidae (*Chironomus anthracinus* Zetterstedt, 1860, *Procladius* sp., *Microtendipes pedellus* De Geer, 1776.), Oligochaeta (*Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1862, *Tubifex tubifex* Muller, 1774). В составе зообентоса озера также отмечены представители моллюсков и нематод (Bivalvia, Nematoda) на илисто-песчаных грунтах. Более 60 % таксонов беспозвоночных в составе бентоса представлено личинками насекомых. Значения биомассы (B) исследованных организмов по станциям варьировали от 3,37 до 9,62 г/м², численности (N) – от 880 до 3820 экз./м². Величина средней биомассы макрозообентоса в летний период 2020 г. составила 5,79 г/м², численность – около 2400 экз./м² (табл. 2). Основу биомассы формировали Chironomidae – 4,93 г/м² при численности 1625 экз./м².

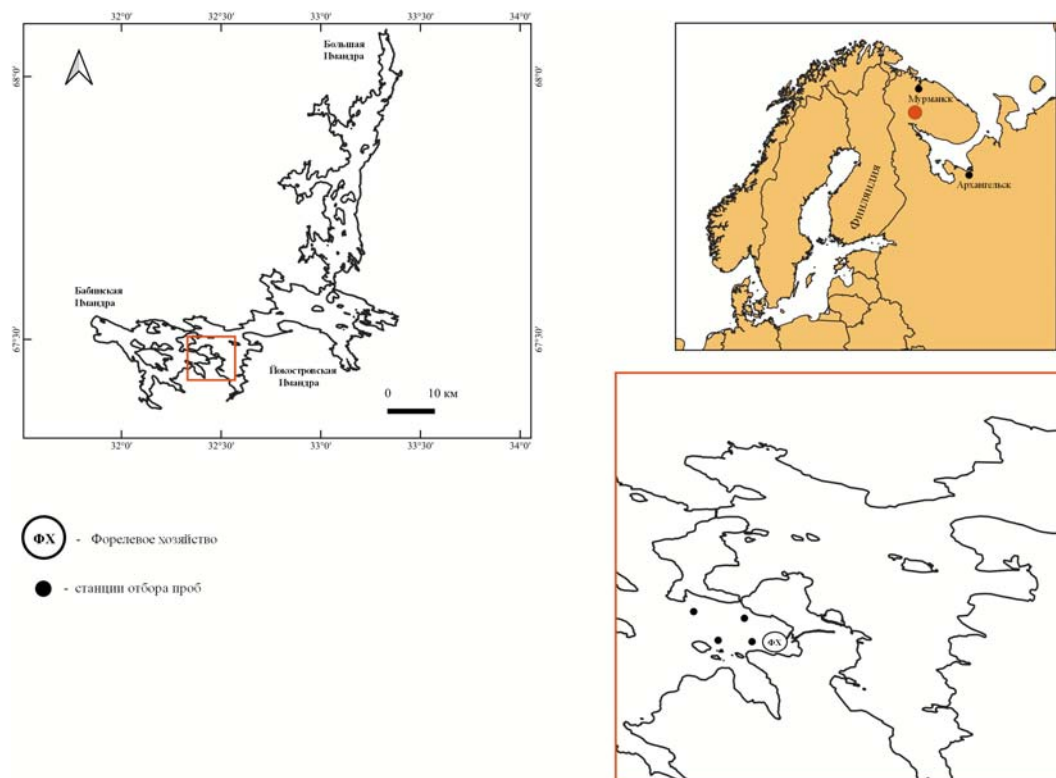


Рис. 1. Картосхема района исследования в губе Молочной (Бабинская Имандра)

Fig. 1. Schematic map of the study area in Molochnaya Bay (Babinskaya Imandra)

Таблица 1. Список видов макрозообентоса в оз. Имандра в районе исследования

Table 1. List of macrozoobenthos species in Lake Imandra in the study area

Таксон Taxon	Станции Station			
	1	2	3	4
Класс / Class Oligochaeta				
<i>Tubifex tubifex</i> (Müller, 1774)	++	++	++	++
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Claparède, 1862	++	++	++	++
<i>Spirosperma ferox</i> Eisen, 1879	-	-	-	+
Класс / Class Nematoda				
<i>Nematoda</i> spp.	+	+	+	-
Класс / Class Insecta				
Отряд / Order Diptera				
Семейство / Family Chironomidae				
<i>Monodiamesa bathyphila</i> Kieffer, 1918	+	+	-	-
<i>Prodiamesa olivacea</i> Meigen, 1818	+	+	+	-
<i>Tanytarsus gregarius</i> Kieffer, 1909	+	-	-	+
<i>T. bathophilus</i> Kieffer, 1911	+	-	-	+
<i>Microtendipes pedellus</i> (De Geer, 1776)	+++	+++	+++	+++
<i>Polypedilum nubeculosum</i> (Meigen, 1804)	+	-	-	-
<i>Stictochironomus crassiforceps</i> (Kieffer, 1922)	-	-	-	++
<i>Chironomus anthracinus</i> Zetterstedt, 1860	++	+++	+++	-
<i>Chironomus</i> sp.	+++	++	-	++
<i>Procladius</i> sp.	+	++	++	+
Класс / Class Bivalvia				
<i>Pisidium</i> sp.	+	-	-	+

Примечание. (+++) – доминант по численности, (++) – субдоминант, (+) – единичные находки, (-) – отсутствие вида.

Note. (+++) – dominant in number, (++) – subdominant, (+) – single findings, (-) – absence of species.

Таблица 2. Средняя численность и биомасса макрозообентоса оз. Имандра в районе постановки садков (2020 г.)

Table 2. Average abundance and biomass of macrozoobenthos of Lake Imandra in the area of cage installation (2020)

Таксоны / Taxon	N, экз./м ² N, spec./m ²	ДИ	N, %	B, г/м ² B, g/m ²	ДИ	B, %	F, %
Chironomidae	1625 ± 65	1582–1700	69,35	4,93 ± 0,19	67–72	85,14	100,00
Oligochaeta	615 ± 31	598–631	26,25	0,75 ± 0,03	25–27	12,95	100,00
Bivalvia	30 ± 1,2	29–31	1,28	0,1 ± 0,013	1,25–1,31	1,71	50,00
Nematoda	73 ± 4,38	71–75	3,12	0,01 ± 0,004	3,03–3,21	0,20	75,00
Total	2343		100	5,79		100	-

Примечание. N – средняя численность (приведена со значениями стандартной ошибки); N, % – относительная численность; B – средняя биомасса (приведена со значениями стандартной ошибки); B, % – относительная биомасса; F, % – встречаемость таксонов от общего числа проб; ДИ – доверительный интервал (95 %).

Note. N – average abundance (given with standard error); N, % – relative abundance; B – average biomass (given with standard error); B, % – relative biomass; F, % – occurrence of taxa from the total number of samples; ДИ – confidence interval (95 %).

По результатам наших исследований отмечены пиковые значения для донной фауны в условиях комплексного воздействия сразу нескольких факторов – АЭС и форелевого хозяйства. В зоне отбора проб рядом с садками

зарегистрированы превышающие средние по Молочной губе и в целом по водоему значения биомассы (5,79 г/м²) и численности (2343 экз./м²) макрозообентоса (рис. 2, 95% ДИ: 2281–2404).

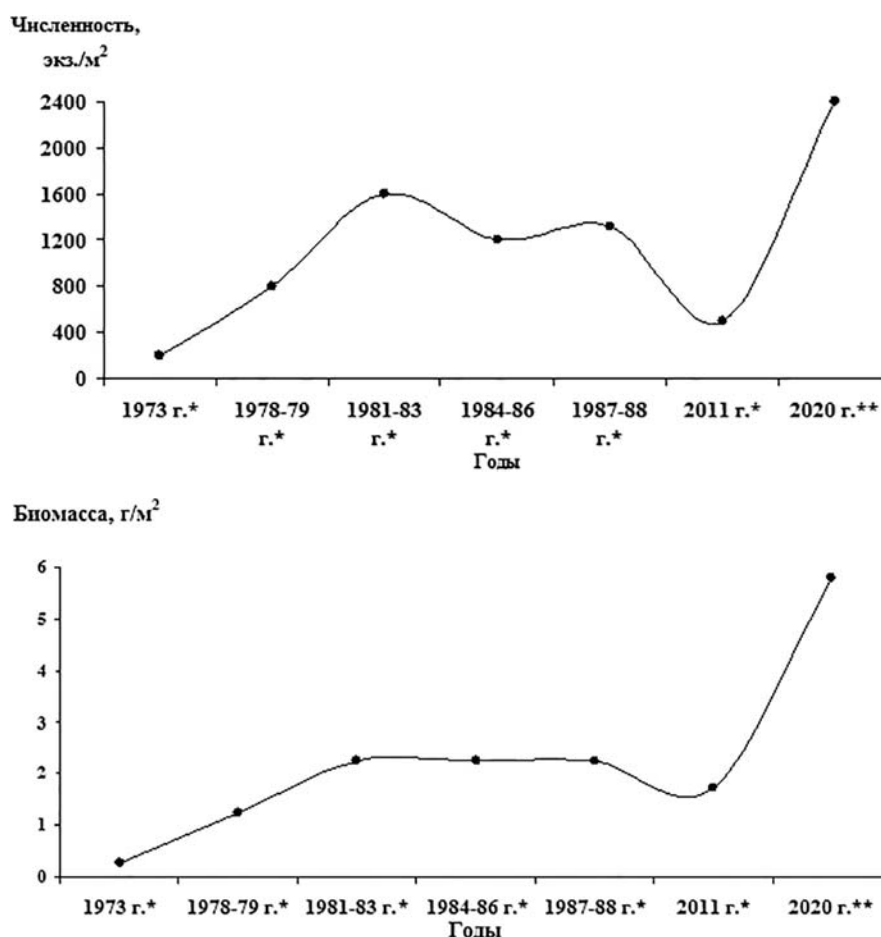


Рис. 2. Численность и биомасса макрозообентоса Молочной губы оз. Имандра в разные годы (*архивные данные, **наши данные)

Fig. 2. Abundance and biomass of macrozoobenthos of Molochnaya Bay of Lake Imandra in different years (*archival data, **authors' data)

Индекс видового разнообразия Шеннона – Уивера (H) для исследованного водоема варьировал от 1,14 до 1,42, в среднем он составил $1,32 \pm 0,16$, что свидетельствует о незначительном видовом обилии донных организмов и сложившейся структуре доминирующих таксонов. Олигохетный индекс Гуднайта – Уитлея (OI = 38,6 %), основанный на соотношении численности олигохет и общей численности всех организмов макрозообентоса, позволяет отнести водоем к 2–3 классу качества вод. Согласно показателю индекса сапробности Пантле – Букка (S = 2,93), полученному с использованием 7 таксонов макрозообентоса (видов-индикаторов), водоем относится к α -мезосапробному типу. По шкале трофности Имандра соответствует β -мезотрофным водоемам.

Обсуждение

Озеро Имандра долгое время испытывает воздействие антропогенного фактора вследствие развитой промышленности региона, что значительно влияет на качество вод и донных отложений. По результатам исследований района Бабинской Имандры, испытывающего влияние подогретых вод Кольской АЭС, прослеживалась относительно стабильная динамика количественных показателей [Валькова, Кашулин, 2013].

Одним из новых факторов, оказывающих влияние на губу, служит действующее с 2014 года садковое рыболовное хозяйство. Как правило, культивирование рыб сопровождается внесением в водоем повышенного количества биогенов вследствие кормления и процессов метаболизма у гидробионтов. Многочисленные исследования подтверждают негативный для экологического состояния водной среды эффект в районах форелеводства [Анохина и др., 2016; Стерлигова и др., 2018].

В структуре руководящего комплекса донной фауны по результатам научных изысканий более ранних лет в период 1973–1978 гг. основу бентоса (до 80 % численности и 60 % биомассы) формировали олигохеты *Limnodrilus hoffmeisteri*. По данным 2011 года около 50 % всех видов и форм зообентоса приходилось на представителей семейства Chironomidae, показатели общей численности и биомассы макрозообентоса составили 1915 экз./м² и 1,8 г/м² [Валькова, Кашулин, 2013].

Следует заметить, что для илистых субстратов в разные годы отмечали повышенные количественные показатели макробеспозвоночных, в основном за счет массового развития крупных личинок хирономид рода *Chironomus*.

Многолетние исследования макрозообентоса губы Молочной выявили, что в последние годы численность и биомасса бентофауны растут. По результатам предыдущих работ, содержание биогенов в данном районе имеет колебательный характер с выраженной межгодовой и сезонной изменчивостью, с пиком в зимний период [Моисеенко, Яковлев, 1990; Антропогенные..., 2002; Кашулин и др., 2018б; Даувальтер и др., 2023]. Кроме того, отмечено повышенное содержание ионов аммония в зоне влияния рыболовного хозяйства, что напрямую свидетельствует об активных процессах первичного разложения органических остатков в придонном слое и на мягких субстратах под садками [Анохина и др., 2016].

Сопоставление архивных данных и наших исследований показало, что длительный период наблюдалась стабильность в составе доминирующих групп макрозообентоса в существующих условиях [Моисеенко, Яковлев, 1990; Валькова, Кашулин, 2013; Кашулин и др., 2018б; Moiseenko, Sharov, 2019]. Одним из постоянных компонентов бентоценоза в губе Молочной является амфипода *Monoporeia affinis* [Моисеенко и др., 2009; Валькова, Кашулин, 2013; Moiseenko, Sharov, 2019]. В наших исследованиях данный вид не был представлен, что, по всей видимости, связано с биологическими особенностями реликта и условиями биотопов, в которых отбирались пробы.

Исследования антропогенно нарушенных водоемов (в т. ч. озера Имандра) выявили рост численности зообентоса при одновременном снижении видового обилия. Как правило, формировалось сообщество из хирономид (*Chironomus*, *Procladius*), круглых червей (*Nematoda*), малощетинковых червей (*Tubifex tubifex*, *Limnodrilus hoffmeisteri*) с высокой численностью и скудным списком видов. За счет высоких концентраций биогенных элементов и высокой толерантности к комплексному загрязнению в донных сообществах увеличивалась доля эврибионтных видов [Moiseenko, Sharov, 2019; Современное..., 2021; Палеоолимология..., 2022; Даувальтер и др., 2023].

Для озер тундровой, лесотундровой и таежной зон характерно низкое природное содержание органического вещества и биогенных элементов, что позволяет говорить об их олиготрофии. Однако факторы урбанизации и экологической нагрузки от различных типов промышленности в импактных зонах ведут к обогащению вод биогенными и органическими веществами, трансформируя трофический статус водоемов [Моисеенко и др., 2009].

Заключение

Комплексное исследование сообщества макрозообентоса губы Молочной озера Имандра выявило устойчивую негативную динамику экосистемы, обусловленную многолетней (свыше 60 лет) антропогенной нагрузкой различного генезиса.

Для зообентоса исследованного района характерно снижение таксономического разнообразия донной фауны с доминированием толерантных к загрязнению таксонов в условиях β -мезотрофии, что отражает умеренное обогащение биогенными элементами. Следует отметить, что сохранение доминирующих таксонов не отражает здоровье экосистемы, а является, по всей видимости, результатом их адаптации к стрессовым условиям.

Для рационального использования арктических водоемов с развитым рыболовством необходимо проводить регулярный мониторинг зообентоса как чувствительного индикатора состояния водной среды.

Литература

- Абакумов В. А. Руководство по методам гидро-биологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 21–33.
- Анохина В. С., Кравец П. П., Малавенда С. С., Приймак П. Г., Тюкина О. С. Оценка экологического состояния губы Молочной озера Имандра в зоне аквакультуры // *Известия КГТУ*. 2016. № 42. С. 11–29.
- Александров С. В. Влияние климатических изменений на уровень эвтрофирования Куршского залива // *Вестник Рос. гос. ун-та им. И. Канта*. 2010. Вып. 1. С. 49–57.
- Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Отв. ред. Т. И. Моисеенко. М.: Наука, 2002. 487 с.
- Баканов А. И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов (обзор) // *Биология внутренних вод*. 2000. № 1. С. 68–82.
- Балушкина Е. В. Применение интегрального показателя для оценки качества вод по структурным характеристикам донных сообществ // *Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий*. СПб.: ЗИН РАН, 1997. С. 266–292.
- Биота северных озер в условиях антропогенного воздействия / Ред. Н. Н. Немова, Н. В. Ильмаст, Е. П. Иешко, О. В. Мещерякова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 230 с.
- Валькова С. А., Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Сандимиров С. С. Структура и динамика сообществ зообентоса озера Имандра в зоне влияния медно-никелевого комбината // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2012. Вып. 2. С. 22–39.
- Валькова С. А., Кашулин Н. А. Особенности структуры и функционирования бентосных сообществ в условиях теплового загрязнения // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2013. № 3(16). С. 97–105.
- Волкова А. Ю., Хуобонен М. Э. Оценка морфометрических и рыболовно-биологических показателей сибирского осетра (*Acipenser baerii* Brandt) ленской популяции при выращивании в условиях Крайнего Севера // *Вестник МГТУ*. 2019. Т. 22, № 2. С. 243–248. doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-243-248
- Вшивкова Т. С., Иваненко Н. В., Якименко Л. В., Дроздов К. А. Введение в биомониторинг пресных вод. Владивосток: ВГУЭС, 2019. 239 с.
- Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Демин В. И., Кашулин Н. А., Терентьев П. М., Валькова С. А., Вандыш О. И., Королева И. М., Кудрявцева Л. П., Зубова Е. М., Петрова О. В., Черепанов А. А. Экологическое состояние озера Имандра. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 221 с.
- Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Скуфьина Т. П., Котельников В. А. Устойчивое водопользование в Арктике. Новые подходы и решения // *Арктика: экология и экономика*. 2018а. № 4(32). С. 15–29. doi: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29
- Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М., Зубова Е. М., Королева И. М., Косова А. Л., Черепанов А. А. Комплексные исследования пресноводных экосистем Фенноскандии // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018б. Т. 9. № 9-6. С. 34–86. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.34-86
- Кашулин Н. А., Беккелунд А., Даувальтер В. А., Петрова О. В. Апатитовое горно-обогачительное производство и эвтрофирование арктического озера Имандра // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 3(35). С. 16–34. doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-16-34
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидро-биологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 390 с.
- Моисеенко Т. И., Яковлев В. А. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука, 1990. 220 с.
- Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А., Шаров А. Н., Вандыш О. И., Кудрявцева Л. П. Антропогенная трансформация арктической экосистемы озера Имандра: тенденции к восстановлению после длительного периода загрязнения // *Водные ресурсы*. 2009. Т. 36, № 3. С. 312–325.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос / Под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолихина. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. 457 с.
- Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям / Отв. ред. Д. А. Субетто. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 331 с. doi: 10.17076/m-onegorpaleo23
- Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцова. М.: РАН, 2021. 637 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Кучко Я. А., Комулайнен С. Ф., Савосин Е. С., Барышев И. А.

Состояние пресноводных водоемов Карелии с товарным выращиванием радужной форели в садках. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 127 с.

Терентьева И. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра // Вестник МГТУ. 2017. Vol. 20(1-2). С. 197–204. doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-197-204

Тишков А. А. «Арктический вектор» в сохранении наземных экосистем и биоразнообразия // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 28–43.

Яковлев В. А. Методы оценки качества вод по зообентосу озера Имандра // Мониторинг природной среды Кольского Севера. Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1984. С. 39–50.

Яковлев В. А. Пресноводный зообентос Северной Фенноскандии (разнообразие и антропогенная динамика). Апатиты: КНЦ РАН, 2005. Ч. 1. 161 с.

Яковлев В. А. Реакция зоопланктона и зообентоса на изменение качества воды субарктического водоема (на примере оз. Имандра) // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 6. С. 715–723.

Arctic biodiversity assessment: Status and trends in Arctic biodiversity – Conservation of Arctic Flora and Fauna / Eds. H. H. Meltre, A. B. Josefson. Denmark: Narayana Press, 2013. 674 p.

Culp J. M., Goedkoop W., Christensen T., Christoffersen K. S., Fefilova E., Liljaniemi P., Novichkova A. A., Ólafsson J. S., Sandøy S., Zimmerman Ch. E., Lento J. Arctic freshwater biodiversity: establishing baselines, trends, and drivers of ecological change // Freshwater Biology. 2022. Vol. 67. P. 1–13. doi: 10.1111/fwb.13831

de Jong Y., Verbeek M., Michelsen V., de Place Bjørn P., Los W., Steeman F., Bailly N., Basire C., Chylarecki P., Stloukal E., Hagedorn G., Wetzel F. T., Glöckler F., Kroupa A., Korb G., Hoffmann A., Häuser Ch., Kohlbecker A., Müller A., Güntsch A., Stoev P., Penev L. Fauna Europaea – all European animal species on the web // Biodivers. Data J. 2014. Vol. 2. e4034. doi: 10.3897/BDJ.2.e4034

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4. 9 p.

Magurran A. E. Ecological diversity and its measurement. Netherlands: Springer, 2013. 181 p. doi: 10.1007/978-94-015-7358-0

Moiseenko T., Sharov A. Large Russian Lakes Ladooga, Onega, and Imandra under strong pollution and in the period of revitalization: a review // Geosciences. 2019. Vol. 9(12). Art. 492. doi: 10.3390/geosciences9120492

Roberts K. E., Lamoureux S. F., Kyser T. K., Muir D. C. G., Lafrenière M. J., Iqaluk D., Pieńkowski A. J., Normandeau A. Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of high Arctic Lakes // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Art. 13292. doi: 10.1038/s41598-017-13658-9

Sala O. E., Chapin F. S., Armesto J. J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Hueneke L. F., Jackson R. B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D. M., Mooney H. A., Oesterheld M., Poff N. L., Sykes M. T., Walker B. H., Walker M., Wall D. H. Global biodiversity scenarios for the year 2100 // Science. 2000. Vol. 287. P. 1770. doi: 10.1126/science.287.5459.1770

Solomon C. T., Jones S. E., Weidel B. C., Buffam I., Fork M. L., Karlsson J., Larsen S., Lennon J. T., Read J. S., Sadro S., Saros J. E. Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: current knowledge and future challenges // Ecosystems. 2015. Vol. 18. P. 376–389. doi: 10.1007/s10021-015-9848-y

Timm T. A guide to the freshwater Oligochaeta and Polychaeta of Northern and Central Europe // Lauterbornia. 2009. Vol. 66. P. 1–235.

References

Abakumov V. A. Guidelines for methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. P. 21–33. (In Russ.)

Alekseev V. R., Tsalolikhin S. Ya. (eds.). A key to zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Vol. 2. Zoobenthos. Moscow: KMK; 2016. 457 p. (In Russ.)

Aleksandrov S. V. Influence of climate changes on the level of eutrophication of the Curonian Lagoon. Vestnik Ros. gos. un-ta im. I. Kanta = Bulletin of Immanuel Kant Russian State University. 2010;1:49–57. (In Russ.)

Anokhina V. S., Kravets P. P., Malavenda S. S., Priimak P. G., Tyukina O. S. Assessment of the ecological state of Molochnaya Bay of Lake Imandra in the aquaculture zone. Izvestiya KGTU = Proceedings of Kaliningrad State Technical University. 2016;42:11–29. (In Russ.)

Bakanov A. I. Use of zoobenthos for monitoring freshwater bodies (a review). Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology. 2000;1:68–82. (In Russ.)

Balushkina E. V. Application of an integral indicator for assessing water quality by structural characteristics of bottom communities. Reaktsiya ozernykh ekosistem na izmenenie bioticheskikh i abioticheskikh uslovii = Response of lake ecosystems to changes in biotic and abiotic conditions. St. Petersburg: ZIN RAN; 1997. P. 266–292. (In Russ.)

Culp J. M., Goedkoop W., Christensen T., Christoffersen K. S., Fefilova E., Liljaniemi P., Novichkova A. A., Ólafsson J. S., Sandøy S., Zimmerman Ch. E., Lento J. Arctic freshwater biodiversity: establishing baselines, trends, and drivers of ecological change. Freshwater Biology. 2022;67:1–13. doi: 10.1111/fwb.13831

Dauval'ter V. A., Sandimirov S. S., Denisov D. B., Demin V. I., Kashulin N. A., Terent'ev P. M., Val'kova S. A., Vandysh O. I., Koroleva I. M., Kudryavtseva L. P., Zubova E. M., Petrova O. V., Cherepanov A. A. Ecological state of Lake Imandra. Apatity: KSC RAS; 2023. 221 p. (In Russ.)

de Jong Y., Verbeek M., Michelsen V., de Place Bjørn P., Los W., Steeman F., Bailly N., Basire C., Chylarecki P., Stloukal E., Hagedorn G., Wetzel F. T., Glöckler F., Kroupa A., Korb G., Hoffmann A., Häuser Ch., Kohlbecker A., Müller A., Güntsch A., Stoev P., Penev L. Fauna Europaea – all European animal species on the web. Biodivers. Data J. 2014;2:e4034. doi: 10.3897/BDJ.2.e4034

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4. 9 p.

- Nemova N. N., Il'mast N. V., Ieshko E. P., Meshcheryakova O. V. (eds.). Biota of northern lakes under anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 230 p. (In Russ.)
- Kashulin N. A., Bekkelund A., Dauval'ter V. A., Petrova O. V. Apatite mining and concentration production and eutrophication of Arctic Lake Imandra. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2019;3(35):16–34. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-16-34.
- Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Denisov D. B., Val'kova S. A., Vandysh O. I., Terent'ev P. M., Zubova E. M., Koroleva I. M., Kosova A. L., Cherepanov A. A. Complex investigations of Fennoscandian freshwater ecosystems. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Science Centre RAS*. 2018;9(9-6):34–86. (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.34-86
- Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Skuf'ina T. P., Kotel'nikov V. A. Sustainable water use in the Arctic. New approaches and solutions. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2018;4(32):15–29. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29
- Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 390 p. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Pozdnyakov Sh. R., Rumyantsev V. A. (eds.). Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem under changing climate. Moscow: RAN; 2021. 637 p. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- Magurran A. E. Ecological diversity and its measurement. Netherlands: Springer; 2013. 181 p. doi: 10.1007/978-94-015-7358-0
- Meltoftre H. H., Josefson A. B. (eds.). Arctic biodiversity assessment: Status and trends in Arctic biodiversity – Conservation of Arctic Flora and Fauna. Denmark: Narayana Press; 2013. 674 p.
- Moiseenko T. I. (ed.). Anthropogenic modifications of the Lake Imandra ecosystem. Moscow: Nauka; 2002. 487 p. (In Russ.)
- Moiseenko T. I., Gashkina N. A., Sharov A. N., Vandysh O. I., Kudryavtseva L. P. Anthropogenic transformations of the Arctic ecosystem of Lake Imandra: tendencies for recovery after long period of pollution. *Water Resources*. 2009;36(3):296–309. doi: 10.1134/S0097807809030051
- Moiseenko T., Sharov A. Large Russian Lakes Ladoga, Onega, and Imandra under strong pollution and in the period of revitalization: a review. *Geosciences*. 2019;9(12):492. doi: 10.3390/geosciences9120492
- Moiseenko T. I., Yakovlev V. A. Anthropogenic transformations of aquatic ecosystems of the Kola North. Leningrad: Nauka; 1990. 220 p. (In Russ.)
- Roberts K. E., Lamoureux S. F., Kyser T. K., Muir D. C. G., Lafrenière M. J., Iqaluk D., Pieńkowski A. J., Normandeau A. Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of high Arctic Lakes. *Scientific Reports*. 2017;7:13292. doi: 10.1038/s41598-017-13658-9
- Sala O. E., Chapin F. S., Armesto J. J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Huenneke L. F., Jackson R. B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D. M., Mooney H. A., Oesterheld M., Poff N. L., Sykes M. T., Walker B. H., Walker M., Wall D. H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*. 2000;287:1770. doi: 10.1126/science.287.5459.1770
- Solomon C. T., Jones S. E., Weidel B. C., Buffam I., Fork M. L., Karlsson J., Larsen S., Lennon J. T., Read J. S., Sadro S., Saros J. E. Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: current knowledge and future challenges. *Ecosystems*. 2015;18:376–389. doi: 10.1007/s10021-015-9848-y
- Sterligova O. P., Il'mast N. V., Kuchko Ya. A., Komulainen S. F., Savosin E. S., Baryshev I. A. State of freshwater reservoirs in Karelia with commercial cage farming of rainbow trout. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2018. 127 p. (In Russ.)
- Subetto D. A. (ed.). Paleolimnology of Lake Onego: from the Onego ice lake to the present state. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2022. 331 p. (In Russ.). doi: 10.17076/m-onegopaleo23
- Terent'eva I. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Estimate of the trophic status of subarctic Lake Imandra. *Vestnik MGTU = Bulletin of Murmansk State Technical University*. 2017;20(1–2):197–204. (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-197-204
- Timm T. A guide to the freshwater Oligochaeta and Polychaeta of Northern and Central Europe. *Lauterbornia*. 2009;66:1–235.
- Tishkov A. A. "Arctic vector" in the conservation of terrestrial ecosystems and biodiversity. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2012;2(6):28–43. (In Russ.)
- Val'kova S. A., Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Sandimirov S. S. Structure and dynamics of zoobenthos communities in Lake Imandra near a copper-nickel smelter. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Science Centre RAS*. 2012;2:22–39. (In Russ.)
- Val'kova S. A., Kashulin N. A. Features of structure and functioning of benthic communities under thermal pollution. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Science Centre RAS*. 2013;3(16):97–105. (In Russ.)
- Volkova A. Yu., Khuobonen M. E. Assessment of morphometric and fish-breeding biological indicators of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt) of the Lena population grown in the Far North. *Vestnik MGTU = Bulletin of Murmansk State Technical University*. 2019;22(2):243–248. (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-243-248
- Vshivkova T. S., Ivanenko N. V., Yakimenko L. V., Drozdov K. A. Introduction to freshwater biomonitoring. Vladivostok: VSUES; 2019. 239 p. (In Russ.)
- Yakovlev V. A. Freshwater zoobenthos of Northern Fennoscandia (diversity and anthropogenic dynamics). Apatity: KSC RAS; 2005. Part 1. 161 p. (In Russ.)
- Yakovlev V. A. Methods for assessing water quality using zoobenthos of Lake Imandra. *Monitoring prirodnoi sredy Kol'skogo Severa = Monitoring of the natural environment of the Kola North*. Apatity: Kol. fil. AN SSSR; 1984. P. 39–50. (In Russ.)
- Yakovlev V. A. Response of zooplankton and zoobenthos to changes in water quality in a subarctic water body (case study of Lake Imandra). *Vodnye resursy = Water Resources*. 1998;25(6):715–723. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 20.09.2025; принята к публикации / accepted: 11.03.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Савосин Евгений Сергеевич

канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории
экологии рыб и водных беспозвоночных

e-mail: szhenya@list.ru

Савосин Денис Сергеевич

канд. биол. наук, младший научный сотрудник
лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных

e-mail: sadenser@inbox.ru

CONTRIBUTORS:

Savosin, Evgeny

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

Savosin, Denis

Cand. Sci. (Biol.), Junior Researcher

УДК 574.58+582.26+58.009

ДИАТОМОВЫЙ МИКРОФИТОБЕНТОС ЗАЛИВА ГРЁН-ФЬОРД (ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН) В ПЕРИОД ПОЛЯРНОЙ НОЧИ

П. Р. Макаревич

Мурманский морской биологический институт РАН (ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038)

Исследован таксономический состав бентосных диатомовых водорослей залива Грён-фьорд (Западный Шпицберген) в период полярной ночи. В донных сообществах идентифицированы живые клетки 47 видов диатомей при абсолютном преобладании пеннатных форм, что характерно для микрофитобентоса арктического побережья. На исследованных станциях общее число видов диатомовых водорослей варьировало в относительно узких пределах – от 31 до 40 таксонов. Максимальное видовое богатство (40 видов) зарегистрировано на станции 2. Основу сообществ донных микроводорослей залива Грён-фьорд составляли типично бентосные формы, представленные 35 таксонами. Планктонные и планктонно-ледовые диатомеи отмечены в незначительном количестве – 3 и 2 вида соответственно. В составе микрофитобентоса преобладали морские (27 видов) и солоноватоводно-морские (15 видов) формы. Пресноводные формы были представлены единично и отмечались лишь эпизодически. Коэффициент флористического сходства Жаккара для пар станций варьировал в пределах 55,5–60 %, что соответствует диапазону от умеренного до высокого сходства. Результаты исследований указывают на существование в бентосе в период полярной ночи жизнеспособного сообщества диатомовых водорослей, которое поддерживает метаболическую активность.

Ключевые слова: Грён-фьорд (Западный Шпицберген); диатомовые водоросли; микрофитобентос; полярная ночь

Для цитирования: Макаревич П. Р. Диатомовый микрофитобентос залива Грён-фьорд (Западный Шпицберген) в период полярной ночи // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 89–97. doi: 10.17076/lim2280

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ММБИ РАН.

P. R. Makarevich. DIATOM MICROPHYTOBENTHOS OF GRØNFJORD BAY (WEST SPITSBERGEN) DURING THE POLAR NIGHT

Murmansk Marine Biological Institute, Russian Academy of Sciences (17 Vladimirskaia St., 183010 Murmansk, Russia)

The taxonomic composition of benthic diatoms in Grønfjord Bay (Western Spitsbergen) was studied during the polar night. Living cells of 47 diatom species were identified

in the benthic communities, with pennate forms overwhelmingly predominating, which is typical of the microphytobenthos of the Arctic coast. At the studied stations, the total number of diatom species varied within relatively narrow limits – from 31 to 40 taxa. The maximum species richness (40 species) was recorded at station 2. The core of the benthic microalgae communities in Grønfjord Bay were typically benthic forms, represented by 35 taxa. The quantities of planktonic and planktonic/ice diatoms were minor – 3 and 2 species, respectively. Marine (27 species) and brackish-marine (15 species) forms predominated in the microphytobenthos. Freshwater forms were present only sporadically and as singular specimens. The Jaccard floristic similarity coefficient for pairs of stations ranged from 55.5 to 60 %, i.e. within moderate to high similarity range. The results indicate that a viable diatom community maintaining metabolic activity exists in the benthos even during the polar night.

Keywords: Grønfjord (West Spitsbergen); diatoms; microphytobenthos; polar night

For citation: Makarevich P. R. Diatom microphytobenthos of Grønfjord Bay (West Spitsbergen) during the polar night. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 89–97. doi: 10.17076/lim2280

Funding. Financial support for the research was provided from the federal budget for the implementation of state assignment to the Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (MMBI RAS).

Введение

Сообщества микрофитобентоса, в которых доминируют диатомовые водоросли (Bacillariophyta), занимают центральное место в формировании первичной продукции прибрежной бентали. Пеннатные диатомеи присутствуют в этих биоценозах круглогодично [Бондарчук, Кузнецов, 1988] и являются основными продуцентами, формируя базовые звенья трофических сетей прибрежных экосистем [Cahoon, 1999; Smola et al., 2017].

Уникальное географическое положение и океанографический режим вод архипелага Шпицберген создают условия для изучения как глобальных, так и региональных биологических процессов в Арктике. Формирование прибрежных фитоценозов в этом районе характеризуется выраженной сезонностью, обусловленной чередованием полярного дня и полярной ночи.

Согласно традиционным представлениям [Nansen, 1902; Ширшов, 1937], в пелагиали арктических морей в период полярной ночи происходит резкий спад биологической активности, что отмечается, в частности, в прибрежных водах высокобореальных районов [Дружкова, 1999]. Пелагические сообщества в это время из-за низкой доступности пищи и минимальной освещенности переходят в состояние покоя и отличаются низкой продуктивностью. Наиболее значительное снижение обилия и активности наблюдается у сообществ первичных продуцентов, жизнедеятельность которых напрямую зависит от светового режима.

Несмотря на появление в последнее время публикаций о диатомовых водорослях микрофитобентоса прибрежных вод Шпицбергена в зимний период [Сапожников, Калинина, 2016; Stachura-Suchoples et al., 2016; Polar..., 2020], эта группировка остается недостаточно изученной. Имеющиеся данные о видовом составе, экологии и количественных показателях донных альгоценозов фрагментарны. Цель настоящей работы – изучить таксономическую и эколого-флористическую структуру бентосных микроводорослей в прибрежной зоне фьордов архипелага Шпицберген в период полярной ночи, который остается малоисследованным.

Диатомовые водоросли обладают видовой специфичностью к широкому спектру абиотических факторов (соленость, температура, ледовый режим, турбулентность, концентрация биогенов), что делает их высокоинформативными биомаркерами и надежными биоиндикаторами современного состояния и происходящих изменений в арктических морских экосистемах [Dixit et al., 1992].

Полученные данные позволят не только расширить фундаментальные знания о биоразнообразии Арктики, но и послужат основой для мониторинга и оценки будущих изменений в этом быстро трансформирующемся регионе.

Материалы и методы

Отбор проб выполнен в заливе Грөн-фьорд (Западный Шпицберген) в ноябре 2019 года в ходе рейса НИС «Дальние Зеленцы»

Мурманского морского биологического института РАН на трех станциях: 1 – 78°05.618' с. ш. 14°06.912' в. д.; 2 – 78°02.798' с. ш. 14°09.388' в. д.; 3 – 78°00.039' с. ш. 14°14.350' в. д. (рис. 1).

Грён-фьорд (норв. Grøn fjorden) – типичный фьорд западного побережья архипелага Шпицберген. Для донных грунтов фьорда характерна четкая пространственная дифференциация: в кутовой части вблизи ледника (ст. 3) залегают алевроито-пелитовые осадки, в средней части (ст. 2) – мягкий мелкоалевритовый ил с примесью песчаного материала, а во внешней части (ст. 1) преобладают гравийно-галечные отложения [Мещеряков, 2017]. Глубины в районе работ были в диапазоне от 71 до 105 м.

Соленость воды в период отбора проб в акватории Грён-фьорда была выше 34,50 ПСЕ, а в придонном горизонте на всех станциях достоверно не различалась. Температура воды у дна колебалась от 3,9 до 4,2 °С.

Колонку донных отложений отбирали дночерпателем «Ван-Вин», далее из верхнего двухсантиметрового слоя донных осадков пластиковым

пробоотборником с диаметром внутреннего сечения 10 мм отбирали пробу на состав микрофитобентоса, с последующей заморозкой. В лаборатории пробы размораживали и фиксировали 1% раствором формалина до конечной концентрации 0,5 %. Для просветления объектов применяли раствор гипохлорита с последующим нагреванием. Подсчет и таксономическая идентификация створок диатомовых водорослей осуществлялись с использованием светового микроскопа Axiolmager D1 (Carl Zeiss, Германия) с увеличением 100–400 раз, а для увеличения 1000 раз – с применением иммерсионного объектива. Просматривались все отобранные пробы.

Для диагностики физиологического состояния клеток микроводорослей использовали метод люминесцентной микроскопии (увеличение $\times 480$ и $\times 1080$). Работы проводились *in vivo* на борту судна с применением модифицированного метода «живой капли» [Методические..., 1989; Горюнова, 1952]. Дополнительно для оценки жизнеспособности клеток было применено окрашивание нейтральным красным [Zetsche, Meysman, 2012].

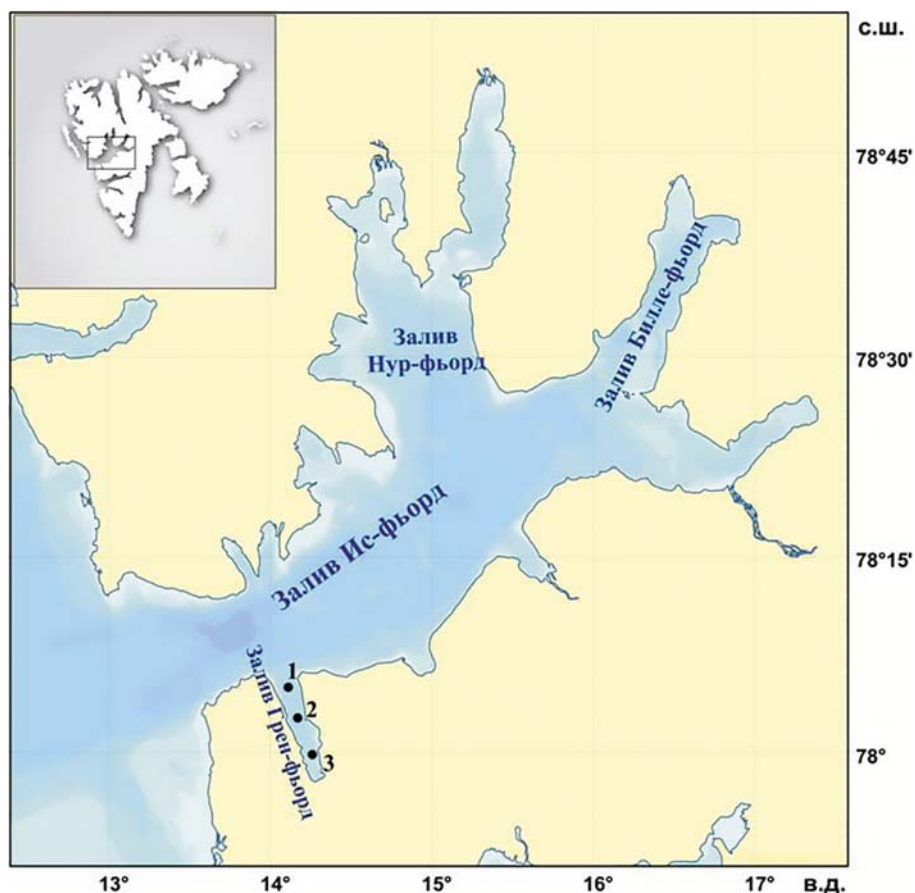


Рис. 1. Карта-схема района работ и расположение станций отбора проб
Fig. 1. Schematic map of the study area and location of sampling stations

Определение видов проводили с использованием определителей и монографий, в том числе: «Диатомовый анализ» [1949, 1950], «Диатомовая флора литорали Баренцева моря» [Короткевич, 1960], «Diatom flora of marine coasts» [Witkowski et al., 2000] и «Диатомовые водоросли водоемов Русской Арктики: архипелаг Новая Земля и остров Вайгач» [Генкал, Вехов, 2007]. Названия видов и систематических групп, а также экологические характеристики микроводорослей приведены согласно номенклатуре, принятой в электронных источниках [von Quillfeldt et al., 2003; AlgaeBase..., 2025; WoRMS..., 2025].

Для оценки флористического сходства бентосных альгоценозов использовали коэффициент Жаккара (Kj) [Миркин и др., 1989].

Результаты и обсуждение

В пробах донных отложений были идентифицированы живые клетки диатомовых водорослей: 47 видов из 20 родов (табл.), представленных как вегетативными, так и споронесущими клетками. Флуоресцентная микроскопия показала наличие хлоропластов в физиологически активном состоянии.

Наличие значительного разнообразия физиологически активных клеток микроводорослей в зимний период и на больших глубинах, где фотосинтез не может служить основным источником энергии, объясняется способностью диатомовых к гетеротрофному питанию [Tuchman et al., 2006; Veuger, van Oevelen, 2011; Fukai et al., 2022]. Данная адаптация становится ключевой в условиях, когда фотосинтез невозможен, например во время полярной ночи. Она включает в себя не только переход на альтернативный тип питания, но и способность формировать покоящиеся стадии – специальные споры или клетки с замедленным метаболизмом [Handy et al., 2024]. Эти структуры позволяют организмам переживать длительные периоды неблагоприятных условий, сохраняя жизнеспособность [Druzhkova et al., 2018].

Видовой состав диатомовых водорослей в исследованных донных сообществах сформирован таксонами, типичными для прибрежных арктических альгоценозов. В пробах преобладали пеннатные диатомеи. Единственной идентифицированной центрической формой оказалась *Melosira arctica* – вид, часто относимый к группе планктонно-бентосных [Баринава и др., 2006].

Таксономический состав и экологические характеристики диатомовых водорослей микрофитобентоса залива Грэн-фьорд в период полярной ночи

Taxonomic composition and ecological characteristics of diatoms of the microphytobenthos of the Grenfjord Bay during the polar night

Вид Taxon name	ЭП		Станции Stations		
	Г	МО	1	2	3
<i>Amphiprora alata</i> (Ehrenberg) Kützing, 1844	СМ	Пл		+	
<i>Amphiroa malectrata</i> var. <i>constricta</i> (Heiden) Simonsen, 2000	М	Б		+	+
<i>Amphora laevis</i> Gregory, 1857	М	Б		+	
<i>A. proteus</i> Gregory, 1857	СМ	Б	+		
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin, 1964	СМ	Б	+	+	+
<i>Cocconeis costata</i> Gregory, 1855	М	Б	+	+	+
<i>C. scutellum</i> Ehrenberg, 1838	СМ	Б	+	+	+
<i>Ctenophora pulchella</i> (Ralfs ex Kützing) D. M. Williams & Round, 1986	П	Б		+	
<i>Diploneis interrupta</i> (Kützing) Cleve, 1894	СМ	Б	+	+	+
<i>Diatoma vulgare</i> Bory de Saint-Vincent, 1831	П	Б		+	+
<i>Entomoneis kjellmanii</i> (Cleve) Poulin & Cardinal, 1983	М	Пл Пл-Л	+	+	+
<i>E. paludosa</i> (W. Smith) Reimer, 1975	СМ	Б	+	+	+
<i>Fallacia litoricola</i> (Hustedt) D. G. Mann, 1990	М	Б	+	+	
<i>F. marnieri</i> (Manguin) Witkowski, 2000	М	Б	+		+
<i>Fragilaria mutabilis</i> (W. Smith) Grunow, 1862	М	Б		+	
<i>Fragilariopsis cylindrus</i> (Grunow) Krieger, 1954	М	Пл-Л	+	+	+
<i>F. oceanica</i> (Cleve) Hasle, 1965	М	Пл	+	+	+
<i>Gyrosigma fasciola</i> (Ehrenberg) J. W. Griffith & Henfrey, 1856	М	Б	+	+	+
<i>G. scalpoides</i> (Rabenhorst) Cleve, 1894	М	Б	+	+	+
<i>G. tenuissimum</i> (W. Smith) Griffith & Henfrey, 1856	М	Б	+	+	+
<i>Halumphora coffeiformis</i> (C. Agardh) Levkov, 2009	М	Б		+	+

Окончание табл.
Table (continued)

Вид Taxon name	ЭП		Станции Stations		
	Г	МО	1	2	3
<i>H. eunotia</i> (Cleve) Levkov, 2009	СМ	Б		+	
<i>H. hyalina</i> (Kützing) Rimet & R. Jahn in Rimet et al., 2018	М	Б	+		+
<i>H. terroris</i> (Ehrenberg) Wang in Wang et al., 2014	М	Б	+		+
<i>H. woelfeliae</i> Stachura et al., 2015	М	Б Пл-Л			+
<i>Martyana martyi</i> (Héribaud-Joseph) Round, 1990	СМ	Б			+
<i>Melosira arctica</i> Dickie, 1852	М	Пл-Л	+	+	+
<i>Navicula directa</i> (W. Smith) Ralfs, 1861	М	Б	+	+	+
<i>N. distans</i> (W. Smith) Ralfs, 1861	М	Б	+	+	+
<i>N. gemmatula</i> var. <i>gemmatula</i> Grunow in Schmidt et al., 1875	П	Б		+	+
<i>N. hamulifera</i> var. <i>hamulifera</i> Grunow in Cleve & Grunow, 1880	М	Б		+	+
<i>N. peregrina</i> var. <i>peregrina</i> (Ehrenberg) Kützing, 1844	М	Б		+	+
<i>N. perminuta</i> Grunow, 1880	СМ	Б		+	
<i>N. placentula</i> (Ehrenberg) Kützing, 1844	П	Б		+	
<i>N. rhynchotella</i> Lange-Bertalot, 1993	СМ	Б	+	+	
<i>N. transitans</i> Cleve, 1883	М	Б	+	+	+
<i>Nitzschia capitellata</i> Hustedt, 1922	П	Б			+
<i>N. longissima</i> (Brébisson) Ralfs, 1861	СМ	Пл Б	+	+	+
<i>N. polaris</i> Grunow ex Cleve, 1883	М	Пл Б Пл-Л	+	+	+
<i>N. sigma</i> (Kützing) W. Smith, 1853	СМ	Пл Б		+	
<i>Pleurosigma angulatum</i> (Queckett) W. Smith, 1852	СМ	Б	+	+	+
<i>P. elongatum</i> W. Smith, 1852	СМ	Пл Б	+	+	+
<i>P. formosum</i> W. Smith, 1852	М	Б		+	
<i>P. stuxbergii</i> Cleve & Grunow, 1880	М	Пл Б	+	+	+
<i>Surirella ovalis</i> f. <i>ovata</i> (Kützing) Mayer, 1919	М	Б		+	+
<i>Synedra hyperborea</i> var. <i>hyperborea</i> Grunow, 1884	М	Пл Б	+	+	
<i>S. tabulata</i> f. <i>tabulata</i> (C. Agardh) Kützing, 1844	СМ	Пл	+	+	

Примечание. ЭП – экологическая приуроченность, Г – галобность, МО – местообитание, П – пресноводные, СМ – солоноватоводно-морские, М – морские, Пл – планктонные, Б – бентосные, Пл-Л – планктонно-ледовые.

Note. ЭП – ecological confinement, Г – halobity of the species, МО – habitat, П – freshwater, СМ – brackish-marine, М – marine, Пл – planktonic, Б – benthic, Пл-Л – planktonic-ice.

Количественное доминирование пеннатных диатомей сохраняется в течение всего года. Однако в апреле–мае (период весеннего развития фитопланктона в пелагиали) и в конце осени, когда вегетационный период фитопланктона завершается, в пробах микрофитобентоса возможно заметное увеличение разнообразия типичных планктонных центральных форм [Бондарчук, Кузнецов, 1988].

Таксономическую структуру микрофитобентоса залива Грэн-фьорд формируют виды, относящиеся к широкому спектру экологических условий (рис. 2). Основу таксономического состава диатомовых составили типично бентосные формы: 34 вида, или 72 % от общего числа. С учетом видов, способных обитать как в донных, так и в пелагических и криопелагических биотопах, разнообразие микрофитобентоса в исследованном районе возрастает до 41 вида – 87 % (рис. 2). Помимо бентосных организмов также обнаружены планктонные и планктонно-ледовые виды (таксоны, для которых лед

служит основным или одним из ключевых местообитаний). Вероятно, экологическая принадлежность некоторых видов требует уточнения.

Отдельно следует отметить виды *Entomo-neis kjellmanii* и *Nitzschia polaris*. Первый входит в состав весеннего ледового и ранневесеннего планктона, способен активно развиваться как во льду, так и в подледной пелагиали, то есть связан с планктонными и криопелагическими биотопами. *Nitzschia polaris* – высокоспециализированная диатомовая водоросль, эволюционно приспособленная к жизни в условиях морского льда полярных регионов. Ее биотопический статус позволяет относить данный вид одновременно к планктонно-бентосным и криопелагическим формам.

Для пяти видов определить основное местообитание затруднительно, поскольку они регистрируются как в пелагиали, так и в бентали; их присутствие в бентосном биотопе в физиологически активном состоянии, вероятно, связано с нахождением покоящихся клеток или спор.

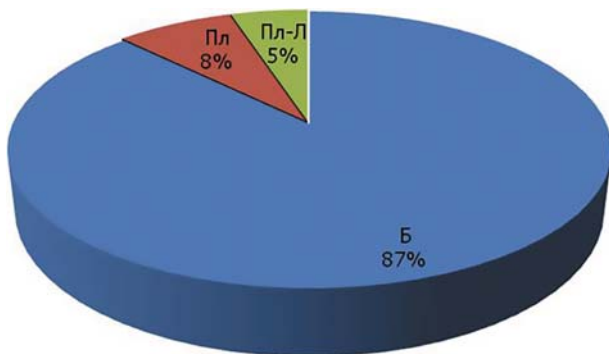


Рис. 2. Соотношение жизненных форм диатомей в микрофитобентосе залива Грэн-фьорд в период полярной ночи: Пл – планктонные, Б – бентосные, Пл-Л – планктонно-ледовые

Fig. 2. The ratio of life forms of diatoms in the microphytobenthos of the Grenfjord Bay during the polar night: Пл – planktonic, Б – benthic, Пл-Л – planktonic-ice

Подобное разнообразие биотопов, заселяемых диатомеями в арктических экосистемах, свидетельствует о широких адаптивных возможностях диатомовых водорослей.

По отношению к солености в структуре сообществ донных микроводорослей залива Грэн-фьорд доминировали виды, характерные для морских и солоноватоводно-морских условий – 27 и 15 таксонов соответственно (рис. 3).

Пресноводные формы были представлены единично и отмечались лишь эпизодически. Их наличие в бентосных сообществах, вероятнее всего, является следствием аллохтонного заноса – попадания клеток микроводорослей

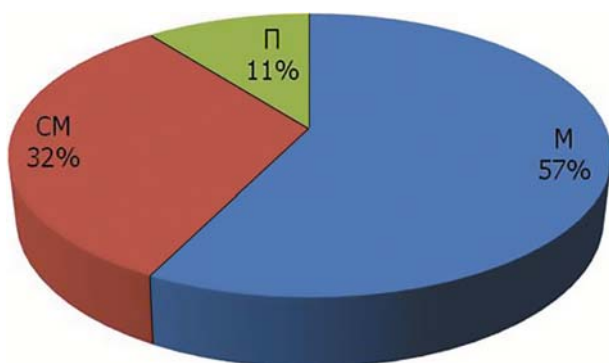


Рис. 3. Соотношение экологических групп диатомей микрофитобентоса залива Грэн-фьорд в период полярной ночи: П – пресноводные, СМ – солоноватоводно-морские, М – морские

Fig. 3. The ratio of ecological groups (habitat) of diatoms of the microphytobenthos of the Grenfjord Bay during the polar night: П – freshwater, СМ – brackish-water-marine, М – marine

в акваторию залива в результате речного и диффузного (склонового) стока в период летнего снеготаяния или дождей. Таким образом, присутствие пресноводных таксонов носит временный характер и не отражает доминирование аутохтонных процессов в формировании донной фитоценотической структуры во фьорде.

Диатомовая флора исследованного района в основном сложена видами с широкой экологической амплитудой и широким географическим распространением. В доминирующем комплексе преобладали космополитные и бореальные виды, что типично для региона и свидетельствует об отсутствии выраженной специфичности или уникальности альгофлоры в период исследований.

Общее число видов диатомовых водорослей на исследованных станциях варьировало в относительно узких пределах – от 31 до 40 таксонов. Максимальное видовое богатство (40 видов) зарегистрировано на станции 2, что может указывать на более благоприятные условия именно здесь для формирования альгоценозов.

Между видовым богатством (количеством видов) и глубиной в точках отбора проб не выявлено достоверной корреляции. Это позволяет предположить, что в условиях данного водоема (акватории) на горизонтальное распределение таксономического разнообразия диатомовых водорослей в большей степени влияют другие факторы.

Таким образом, пространственное распределение видового богатства диатомей на исследованном участке носило мозаичный характер и не было детерминировано батиметрическим градиентом.

Количественная оценка сходства донных диатомовых ценозов на исследованных станциях проведена с использованием коэффициента Жаккара (Kj). Полученные значения составили: 57,7 % для парного сравнения станций 1 и 2, 60,0 % для станций 1 и 3 и 55,5 % для станций 2 и 3. Все рассчитанные коэффициенты находятся в диапазоне от умеренного до высокого сходства, что является статистически достоверным ($p < 0,05$) показателем формирования однородного видового комплекса донных диатомей в заливе. Важно отметить, значительное сходство наблюдается даже между пространственно удаленными станциями, что указывает на единство экологических условий на исследованных участках. Качественный анализ подтвердил выявленное сходство. Для всех трех станций было характерно наличие общего видового ядра, состоящего из 22 таксонов.

В его состав вошли:

1. Морские виды (12 таксонов): *Cocconeis costata*, *Fragilariopsis cylindrus*, *F. oceanica*, *Gyrosigma fasciola*, *G. scalproides*, *G. tenuissimum*, *Melosira arctica*, *Navicula directa*, *N. distans*, *N. transitans*, *Nitzschia polaris*, *Pleurosigma stuxbergii*.

2. Солоноватоводно-морские виды (7 таксонов): *Cylindrotheca closterium*, *Cocconeis scutellum*, *Diploneis interrupta*, *Entomoneis paludosa*, *Nitzschia longissima*, *Pleurosigma angulatum*, *P. elongatum*.

Преобладание в общем ядре стеногалинных морских и эвригалинных солоноватоводно-морских видов отражает типично морской характер среды в придонном слое на большей части акватории.

Основное различие между станциями обусловлено составом пресноводной (аллохтонной) флоры. Наибольшее сходство по этому параметру демонстрируют станции 2 и 3. Помимо двух общих для них пресноводных таксонов – *Diatoma vulgare* и *Navicula gemmatula* var. *gemmatula* – на этих станциях зарегистрировано максимальное количество пресноводных видов: 4 и 3 соответственно.

Станции 2 и 3, по-видимому, находятся под прямым или опосредованным влиянием стока рек Грёндален и Бретьёрна, при этом величины солености, зафиксированные в придонном горизонте на этих станциях, соответствовали океаническим, но в летне-осенний период происходит сезонное снижение значений солености. Таким образом, несмотря на общее высокое сходство сообществ, локальное опреснение является одним из факторов, увеличивающих видовое богатство за счет аллохтонной пресноводной флоры и формирующих дополнительные градиенты в распределении диатомовых водорослей в исследованном заливе.

Заключение

Проведенное исследование микрофитобентоса залива Грэн-фьорд (архипелаг Шпицберген) в период полярной ночи позволило существенно дополнить представления о функционировании арктических прибрежных экосистем в экстремальных условиях освещенности. Вопреки традиционным представлениям о глубоком спаде биологической активности в полярную ночь, нами было обнаружено 47 видов и 20 таксонов надвидового ранга диатомовых водорослей, находящихся в физиологически активном состоянии. Это подтверждает гипотезу о том, что бентосные сообщества микроводорослей могут поддерживать биоразнообразие

и продукционный потенциал экосистемы в темновой период.

Таксономическая структура выявленного сообщества типична для высокоширотных бенталей: абсолютное большинство (более 98 %) составляли пеннатные диатомеи с доминированием морских и солоноватоводно-морских форм. Обнаружение жизнеспособных клеток, включая виды с доказанной способностью к гетеротрофному питанию, указывает на ключевую роль физиолого-биохимических адаптаций, позволяющих диатомеям выживать и сохранять метаболическую активность в условиях многомесячной темноты.

Пространственный анализ выявил высокую степень однородности донных альгоценозов по качественному составу (коэффициент Жаккара 55–60 %), что свидетельствует о стабильности абиотических факторов в придонном горизонте исследованной акватории. Наличие общего ядра из 22 таксонов, включающего типичные морские стеногалинные виды, определяет автохтонную основу сообщества. В то же время присутствие пресноводных аллохтонных видов в средней и кутовой частях фьорда (ст. 2 и 3) демонстрирует влияние локального стока, которое, несмотря на высокую соленость придонных вод, формирует мозаичность в распределении диатомей за счет сезонного опреснения и заноса аллохтонных элементов.

Полученные данные подтверждают высокий биоиндикационный потенциал диатомовых водорослей. Чувствительность их видовой структуры даже к незначительным изменениям среды (в частности, к влиянию пресноводного стока) делает микрофитобентос удобным инструментом для мониторинга состояния арктических экосистем в условиях современных климатических изменений. Расширение списка видов, активно функционирующих в полярную ночь, вносит вклад в понимание глобального биоразнообразия Арктики и подчеркивает необходимость круглогодичных исследований для адекватной оценки продуктивности и устойчивости прибрежных биоценозов.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории планктона ММБИ РАН за помощь в обработке проб и консультирование по верификации полученных данных.

Литература

Баринава С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.

Бондарчук Л. Л., Кузнецов Л. Л. Сезонная динамика диатомовой флоры верхней сублиторали Баренцева моря // Новости систематики низших растений. 1988. Т. 25. С. 27–31.

Генкал С. И., Вехов Н. В. Диатомовые водоросли водоемов Русской Арктики: архипелаг Новая Земля и остров Вайгач. М.: Наука, 2007. 64 с.

Горюнова С. В. Применение метода флуоресцентной микроскопии для определения живых и мертвых клеток водорослей // Труды института микробиологии. 1952. Т. 2. С. 57–64.

Диатомовый анализ / Под ред. А. И. Прошкиной-Лавренко. М.: Гос. изд. геол. лит., 1949. Кн. 2. 444 с.; 1950. Кн. 3. 633 с.

Дружкова Е. И. Нанофитопланктон прибрежной зоны морей Северной Европы (Баренцево и Северное моря): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1999. 23 с.

Короткевич О. С. Диатомовая флора литорали Баренцева моря // Труды Мурманского морского биологического института. 1960. Вып. 1(5). С. 68–338.

Методические рекомендации по анализу количественных и функциональных характеристик морских биоценозов северных морей. Часть 1. Фитопланктон. Зоопланктон. Взвешенное органическое вещество / Сост. П. Р. Макаревич, Н. В. Дружков. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1989. 29 с.

Мещеряков Н. И. Современное осадконакопление в заливе Грэн-фьорд (Западный Шпицберген): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2017. 29 с.

Миркин Б. М., Розенберг Г. С., Наумова Л. Г. Словарь понятий и терминов современной фитоценологии. М.: Наука, 1989. 223 с.

Сапожников Ф. В., Калинина О. Ю. Микрофитобентос окрестных акваторий архипелага Шпицберген в зимнее время // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа. 2016. Серия 13. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2016. С. 332–338.

Ширшов П. П. Сезонные явления в жизни фитопланктона полярных морей в связи с ледовым режимом // Труды Арктического института. 1937. Т. 82. С. 47–111.

AlgaeBase. 2025. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Электронный ресурс]. URL: <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 20.12.2025).

Saohon L. B. The role of benthic microalgae in neritic ecosystems // Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev. 1999. Vol. 37. P. 47–86.

Dixit S. S., Smol J. P., Kingston J. C., Charles D. F. Diatoms: powerful indicators of environmental change // Environ. Sci. Technol. 1992. Vol. 26, no. 1. P. 22–33. doi: 10.1021/es00025a002

Druzhkova E., Oleinik A., Makarevich P. Live autochthonous benthic diatoms on the lower depths of Arctic continental shelf. Preliminary results // Oceanologia. 2018. Vol. 60, no. 1. P. 97–100. doi: 10.1016/j.oceano.2017.07.001

Fukai Y., Matsuno K., Fujiwara A., Suzuki K. Physiological response of diatoms in surface sediments to light exposure: a laboratory experiment on a diatom community in sediments from the Chukchi Sea // Front.

Mar. Sci. 2022. Vol. 9. Art. 998711. doi: 10.3389/fmars.2022.998711

Handy J., Juchem D., Wang Q., Schimani K., Skibbe O., Zimmermann J., Karsten U., Herburger K. Antarctic benthic diatoms after 10 months of dark exposure: consequences for photosynthesis and cellular integrity // Front. Plant Sci. 2024. Vol. 15. Art. 1326375. doi: 10.3389/fpls.2024.1326375

Nansen F. Norwegian North polar expedition 1893–1896, scientific results // The oceanography of the north pole basin. Vol. 3. Longmans, Green, Toronto, 1902. 428 p.

Polar night marine ecology / Berge J., Johnsen G., Cohen G. H. (Eds.). Switzerland AG: Springer Nature, 2020. Vol. 4. 375 p. doi: 10.1007/978-3-030-33208-2

Smola Z. T., Tatarek A., Wiktor J. M., jr Wiktor J. M. W., Kubiszyn A., Westawski J. M. Primary producers and production in Hornsund and Kongsfjorden – comparison of two fjord systems // Polish Polar Res. 2017. Vol. 38. P. 351–373. doi: 10.1515/popore-2017-0013

Stachura-Suchoples K., Enke N., Schlie C., Schaub I., Karsten U., Jahn R. Contribution towards a morphological and molecular taxonomic reference library of benthic marine diatoms from two Arctic fjords on Svalbard (Norway) // Polar Biol. 2016. Vol. 39. P. 1933–1956. doi: 10.1007/s00300-015-1683-2

Tuchman N. C., Schollett M. A., Rier S. T., Geddes P. Differential heterotrophic utilization of organic compounds by diatoms and bacteria under light and dark conditions // Hydrobiologia. 2006. Vol. 561. P. 167–177. doi: 10.1007/s10750-005-1612-4

Veuger B., van Oevelen D. Long-term pigment dynamics and diatom survival in dark sediment // Limnol. Oceanogr. 2011. Vol. 56, no. 3. P. 1065–1074. doi: 10.4319/lo.2011.56.3.1065

von Quillfeldt C. H., Ambrose W. G., Clough L. M. High number of diatom species in first-year ice from the Chukchi Sea // Polar Biol. 2003. Vol. 26, no. 12. P. 806–818. doi: 10.1007/s00300-003-0549-1

Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D. Diatom flora of marine coasts. Part I. Iconographia Diatomologica. 2000. Vol. 7. 925 p.

WoRMS. 2025. World Register of Marine Species [Электронный ресурс]. URL: <http://www.marinespecies.org/index.php> (дата обращения: 20.12.2025).

Zetsche E.-M., Meysman F. Dead or alive? Viability assessment of micro- and mesoplankton // J. Plankton Res. 2012. Vol. 34. P. 493–509. doi: 10.1093/plankt/fbs018

References

AlgaeBase. 2025. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: <http://www.algaebase.org> (accessed: 20.12.2025).

Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. Diversity of algal indicators in the environmental assessment. Tel Aviv, Israel: Pilies Studio; 2006. 498 p. (In Russ.)

Berge J., Johnsen G., Cohen G. H. (eds.). Polar night marine ecology. Switzerland AG: Springer Nature; 2020. Vol. 4. 375 p. doi: 10.1007/978-3-030-33208-2

Bondarchuk L. L., Kuznetsov L. L. Seasonal dynamics of diatom flora of the upper subtidal of the Barents

Sea. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii = Novitates Systematicae Plantarum non Vascularium*. 1988;25: 27–31. (In Russ.)

Cahoon L. B. The role of benthic microalgae in neritic ecosystems. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 1999;37:47–86.

Dixit S. S., Smol J. P., Kingston J. C., Charles D. F. Diatoms: powerful indicators of environmental change. *Environ. Sci. Technol.* 1992;26(1):22–33. doi: 10.1021/es00025a002

Druzhkova E. I. Nanophytoplankton of the coastal zone of the seas of Northern Europe (Barents and North Seas): Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1999. 23 p. (In Russ.)

Druzhkova E., Oleinik A., Makarevich P. Live autochthonous benthic diatoms on the lower depths of Arctic continental shelf. Preliminary results. *Oceanologia*. 2018;60(1):97–100. doi: 10.1016/j.oceano.2017.07.001

Fukai Y., Matsuno K., Fujiwara A., Suzuki K. Physiological response of diatoms in surface sediments to light exposure: a laboratory experiment on a diatom community in sediments from the Chukchi Sea. *Front. Mar. Sci.* 2022;9:998711. doi: 10.3389/fmars.2022.998711

Genkal S. I., Vekhov N. V. Diatom algae of the reservoirs of the Russian Arctic: Novaya Zemlya Archipelago and Vaygach Island. Moscow: Nauka; 2007. 64 p. (In Russ.)

Goryunova S. V. Application of fluorescence microscopy method for determination of live and dead algae cells. *Trudy Instituta mikrobiologii = Proceedings of the Institute of Microbiology*. 1952;2:57–64. (In Russ.)

Handy J., Juchem D., Wang Q., Schimani K., Skibbe O., Zimmermann J., Karsten U., Herburger K. Antarctic benthic diatoms after 10 months of dark exposure: consequences for photosynthesis and cellular integrity. *Front. Plant Sci.* 2024;15:1326375. doi: 10.3389/fpls.2024.1326375

Korotkevich O. S. Diatom flora of the Barents Sea littoral. *Trudy Murmanskogo morskogo biologicheskogo instituta = Proceedings of the Murmansk Marine Biological Institute*. 1960;1(5):68–338. Moscow; Leningrad. (In Russ.)

Makarevich P. R., Druzhkov N. V. (comps.). *Methodological recommendations for the analysis of quantitative and functional characteristics of marine biocenoses in the northern seas. Part 1. Phytoplankton. Zooplankton. Suspended organic matter*. Apatity: KNTs AN SSSR; 1989. 29 p. (In Russ.)

Meshcheryakov N. I. Modern sedimentation in the Grønfjorden (Western Spitsbergen): Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. Moscow; 2017. 29 p. (In Russ.)

Mirkin B. M., Rozenberg G. S., Naumova L. G. Dictionary of concepts and terms of modern phytocology. Moscow: Nauka; 1989. 223 p. (In Russ.)

Nansen F. Norwegian North polar expedition 1893–1896, scientific results. *The oceanography of the north pole basin*. Vol. 3. Longmans, Green, Toronto; 1902. 428 p.

Proshkina-Lavrenko A. I. (ed.). Diatomic analysis. Vol. 2. Moscow: Gos. izd-vo geol. lit.; 1949. Book 2. 444 p.; 1950. Book 3. 633 p. (In Russ.)

Sapozhnikov F. V., Kalinina O. Yu. Microphytobenthos of surrounding waters of the Svalbard Archipelago in winter. *Kompleksnye issledovaniya prirody Shpitsbergena i prilizhashchego shel'fa = Complex studies of the nature of Spitsbergen and the adjacent shelf*. 2016;13: 332–338. Rostov-on-Don: YUNTs RAN; 2016. (In Russ.)

Shirshov P. P. Seasonal phenomena in the life of phytoplankton in polar seas in connection with the ice regime. *Trudy Arkticheskogo instituta = Proceedings of the Arctic Institute*. 1937;82:47–111. (In Russ.)

Smola Z. T., Tatarek A., Wiktor J. M., jr Wiktor J. M. W., Kubiszyn A., Westawski J. M. Primary producers and production in Hornsund and Kongsfjorden – comparison of two fjord systems. *Polish Polar Research*. 2017;38:351–373. doi: 10.1515/popore-2017-0013

Stachura-Suchoples K., Enke N., Schlie C., Schaub I., Karsten U., Jahn R. Contribution towards a morphological and molecular taxonomic reference library of benthic marine diatoms from two Arctic fjords on Svalbard (Norway). *Polar Biology*. 2016;39:1933–1956. doi: 10.1007/s00300-015-1683-2

Tuchman N. C., Schollett M. A., Rier S. T., Geddes P. Differential heterotrophic utilization of organic compounds by diatoms and bacteria under light and dark conditions. *Hydrobiologia*. 2006;561:167–177. doi: 10.1007/s10750-005-1612-4

Veuger B., van Oevelen D. Long-term pigment dynamics and diatom survival in dark sediment. *Limnol. Oceanogr.* 2011;56(3):1065–1074. doi: 10.4319/lo.2011.56.3.1065

von Quillfeldt C. H., Ambrose W. G., Clough L. M. High number of diatom species in first-year ice from the Chukchi Sea. *Polar Biol.* 2003;26(12):806–818. doi: 10.1007/s00300-003-0549-1

Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D. Diatom flora of marine coasts. Part I. *Iconographia Diatomologica*. 2000. Vol. 7. 925 p.

WoRMS. 2025. World Register of Marine Species. URL: <http://www.marinespecies.org/index.php> (accessed: 20.12.2025).

Zetsche E.-M., Meysman F. Dead or alive? Viability assessment of micro- and mesoplankton. *J. Plankton Res.* 2012;34(6):493–509. doi: 10.1093/plankt/fbs018

Поступила в редакцию / received: 26.12.2025; принята к публикации / accepted: 10.03.2026.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Макаревич Павел Робертович

д-р биол. наук, профессор, главный научный сотрудник
лаборатории планктона

e-mail: makarevich@mmbi.info

CONTRIBUTOR:

Makarevich, Pavel

Dr. Sci. (Biol.), Professor, Chief Researcher

УДК 551.58 528.8

МНОГОЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ДИНАМИКЕ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ БЕЛОГО МОРЯ: СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ 2003–2020 ГГ.

Е. А. Морозов^{1*}, Д. В. Поздняков²

¹ Морской гидрофизический институт РАН (ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011), * frisman@list.ru

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена» (Фонд «Нансен-центр») (14-я линия В. О., 7, оф. 49, Санкт-Петербург, Россия, 199034)

Приведены и обсуждаются результаты спутниковых наблюдений за качеством вод в Белом море (БМ) в течение вегетационного периода на протяжении 2003–2020 гг. Впервые получены статистические данные почти на двадцатилетнем временном промежутке по пространственно-временной динамике концентраций хлорофилла *a* фитопланктона (ХЛ), консервативной фракции растворенного органического вещества (РОВ) и минеральной взвеси, в сочетании с данными о температуре поверхности воды (ТПВ) и речном стоке. Величина и знак изменений указанных параметров в традиционно выделяемых районах морской акватории оказались различными. Выяснилось, что в процентном отношении произошедшие сдвиги ХЛ относительно невысоки. В Онежском и Мезенском заливах, а также в Воронке и Горле за период 2003–2020 гг. ХЛ выросла за вегетационный сезон в целом в диапазоне от 4 до 8 %, а в Кандалакшском заливе и Бассейне снизилась на ~3 – ~4 %. Таким образом, в условиях происходящего климатического сдвига и на фоне зарегистрированного роста от 2 до ~7 % ТПВ, 11–13-процентного суммарного увеличения (за март–октябрь) стока основных рек БМ и связанного с этим увеличения уровня РОВ на ~2–10 %, а также усиления мутности воды, серьезных изменений в уровне продуктивности БМ не обнаружено. Отсутствие в условиях умеренно меняющихся факторов окружающей среды признаков мультипликативного эффекта в динамике первичного продуцирования дает основание полагать, что экологическая система БМ на современном этапе остается устойчивой.

Ключевые слова: Белое море; дистанционное зондирование; хлорофилл; взвешенное минеральное вещество; окрашенное растворенное органическое вещество; температура поверхности воды; сток рек; влияние потепления климата; пространственно-временная динамика параметров качества воды

Для цитирования: Морозов Е. А., Поздняков Д. В. Многолетние тенденции в динамике развития фитопланктона в поверхностных водах Белого моря: спутниковые наблюдения 2003–2020 гг. // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 98–110. doi: 10.17076/lim2144

Финансирование. Часть исследования выполнена в рамках госзадания МГИ РАН FNNN-2024-0012.

E. A. Morozov^{1*}, D. V. Pozdnyakov². MULTIYEAR TRENDS IN PHYTOPLANKTON GROWTH IN THE WHITE SEA SURFACE WATERS: A SATELLITE STUDY ACROSS 2003–2020

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences (2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia), * frisman@list.ru

²Nansen International Environmental and Remote Sensing Center (14th Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034 St. Petersburg, Russia)

The article presents and discusses the results of satellite observations of water quality in the White Sea (WS) during the growing season from 2003 to 2020. For the first time, statistical data were obtained over an almost twenty-year time interval on the spatio-temporal dynamics of phytoplankton chlorophyll (CHL), chromophoric/refractory dissolved organic matter (DOM), and suspended mineral matter concentrations in conjunction with sea surface temperature (SST) and river discharge. The magnitude and sign of changes in these parameters proved to vary between the traditionally distinguished sub-areas of the sea. However, in percentage terms, the shifts in CHL concentrations were relatively small. In Onega and Mezen Bays, as well as in Voronka and Gorlo, growing-season's CHL concentrations increased in the range of 4–8 % from 2003 to 2020. At the same time, in the Gulf of Kandalaksha and the Basin, primary productivity decreased by ~3 – ~4 %. That is, no major change has occurred in the productivity level of the White Sea. The rise in the SST (2 – ~7 %), however, points to climate warming in the WS region. The 11–13 % increase in the March to October total runoff of the WS main rivers (reflected in the DOM increase by ~2–10 %) is in line with the ongoing climate change. There being no indications of a multiplier effect in the dynamics of primary production under the moderate change in environmental factors, the WS ecological system can presently be assumed to remain quite stable.

Keywords: White Sea; remote sensing; chlorophyll; suspended mineral matter; colored dissolved organic matter; water surface temperature; river runoff; impact of climate warming; spatio-temporal dynamics of water quality parameters

For citation: Morozov E. A., Pozdnyakov D. V. Multiyear trends in phytoplankton growth in the White Sea surface waters: a satellite study across 2003–2020. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 98–110. doi: 10.17076/lim2144

Funding. The study was partially implemented under state assignment to the Marine Hydrophysical Institute RAS FNNN-2024-0012.

Введение

Наблюдающиеся за последние 30 лет значительные сдвиги во многих характеристиках окружающей среды в Арктике [Филатов и др., 2012; Ardyna, Arrigo, 2020; Серых, Толстиков, 2022] находят свое отражение в существенных изменениях состояния ее экосистемы как на панарктическом, так и на региональном уровне [Тишков и др., 2019; Филатов и др., 2019; Серых, Толстиков, 2022; Frolova et al., 2023; Malysheva et al., 2023]. В частности, зарегистрированы изменения в численности и флористическом составе фитопланктонных сообществ и, как следствие, – в функционировании всей цепи трофических взаимодействий [Sergeeva et al., 2020; Кашулин, Беккелунд, 2022].

Это в равной мере относится к Белому морю (БМ) – окраинному средиземному субарктическому водоему. Из характерных черт,

выделяющих БМ на фоне других шельфовых морей Арктики, можно назвать чрезвычайно большое влияние речного стока, поступление значительных объемов вод сопредельного моря, наличие интенсивных приливных течений, а также сильно выраженную морфологическую неоднородность этого водоема. Последняя обуславливает, совместно с речным стоком, отчетливо выраженную в нем районированность гидродинамических процессов и экологических условий.

Влияние пространственно-временной динамики внешних и внутриводных условий на разных временных масштабах прослеживается и на уровне гидробионтов БМ, по-видимому, прежде всего – первичных продуцентов, определяющих иерархические взаимодействия морской трофической системы [Ilyash et al., 2018].

Определяя баланс между процессами продуцирования и разложения, концентрации

фитопланктона, как фотосинтезирующего первичного продуцента, и растворенного хромофорного органического вещества (РОВ) являются экологическими параметрами, отражающими трофический уровень водоема. Концентрация взвешенных частиц, прежде всего взвешенного минерального вещества (ВМВ), как наиболее многочисленных и сильно сказывающихся на уровне прозрачности воды и, следовательно, интенсивности фотохимических процессов, является также важным параметром в оценке состояния природных вод.

Таким образом, концентрации фотосинтезирующего пигмента хлорофилла *a* фитопланктона (ХЛ), как индикатора концентрации клеток всех видов фитопланктона [Roy et al., 2011], а также РОВ и ВМВ являются во многом интегральными индикаторами экологического состояния водоема, часто называемыми параметрами качества воды (ПКВ) [Bukata et al., 1995; Sokoletsky et al., 2012]. Как поглощающие и рассеивающие солнечный свет субстанции, наряду с водой как таковой, ХЛ, РОВ и ВМВ формируют цвет воды, и таким образом, их содержание в водоеме может быть оценено дистанционными оптическими датчиками, измеряющими интенсивность и спектральный состав светового потока, выходящего из-под поверхности воды. Спутниковое дистанционное зондирование позволяет с высоким пространственным и временным разрешением осуществлять синоптический мониторинг текущего состояния и соответствующие количественные оценки в протяженных и биогеохимически неоднородных водных объектах [Копелевич и др., 2018].

Так, по спутниковым данным по БМ установлено, что в течение 1998–2004 гг. в Кандалакшском, Онежском и Северодвинском заливах, а также в Бассейне и Горле за вегетационный период происходило сокращение концентрации ХЛ фитопланктона в пределах от –5 до –20 мкг/л, увеличение мутности, а также окрашенности консервативной/хромоформной фракцией аллохтонного РОВ. При этом конкретные численные показатели носили явно региональный характер, т. е. отчетливую приуроченность к упомянутым районам [Pozdnyakov et al., 2007].

Поскольку выявленные изменения могли быть обусловлены лишь усилением потепления в Арктике [Филатов и др., 2012] и погодными сдвигами непосредственно в районе БМ, полученные результаты давали основание полагать, что экосистемы полузамкнутых шельфовых морей Северного Ледовитого океана довольно оперативно реагируют на климати-

ческие изменения и, таким образом, уязвимы в перспективе усиливающегося глобального потепления.

В настоящей работе расширен временной интервал исследования с момента упомянутых выше наших предыдущих наблюдений 1998–2003 гг. Цель – проследить дальнейшую пространственно-временную динамику содержания в поверхностных водах БМ концентрации ХЛ фитопланктона, консервативной фракции РОВ, а также ВМВ на протяжении 2003–2020 гг., добавив в рассмотрение также данные по температуре поверхности воды (ТПВ) и стоку наиболее полноводных рек (СР). И таким образом актуализировать наше понимание характера влияния на экологию БМ происходящих/усиливающихся процессов потепления климата в Арктическом регионе.

Объект исследования

Как следует из энциклопедической монографии [Filatov et al., 2005], Белое море – субарктический водоем с площадью зеркала 90 000 км². Сильная морфометрическая неоднородность (средние глубины 60 м, максимальная глубина 340 м) проявляется в наличии четырех крупных заливов (Кандалакшский, Онежский, Северодвинский и Мезенский) и резких свалов глубин на границе с Баренцевым морем, а также между центральной частью (Бассейном) и проливом (Горлом), соединяющим БМ с Баренцевым морем через промежуточную область (Воронка), которая непосредственно прилегает к Баренцеву морю (рис. 1). Это определяет естественное районирование БМ и отражает характерную пространственную неоднородность не только гидродинамических процессов, но и экологических условий в БМ, на формирование которых оказывают большое влияние и крупные реки (Мезень и Поной, Онега, Северная Двина, Варзуга, впадающие, соответственно, в Мезенский, Онежский, Двинский заливы и Бассейн), а также множество более мелких рек. Приток пресных/речных вод (максимальный весной и наименьший в конце зимы – начале весны) регулирует уровень моря и величину водообмена с Баренцевым морем: в среднем за год $2 \cdot 10^3$ км³ баренцевоморской воды поступает в БМ и $2,2 \cdot 10^3$ км³ покидают БМ.

Значительно заболоченный водосбор обуславливает поступление в БМ большого количества силикатов, фосфатов, РОВ, нитритного и аммонийного (но не нитратного) азота, обогащая этими веществами поверхностный слой прилежащих к устьям рек беломорских вод и снижая их прозрачность.

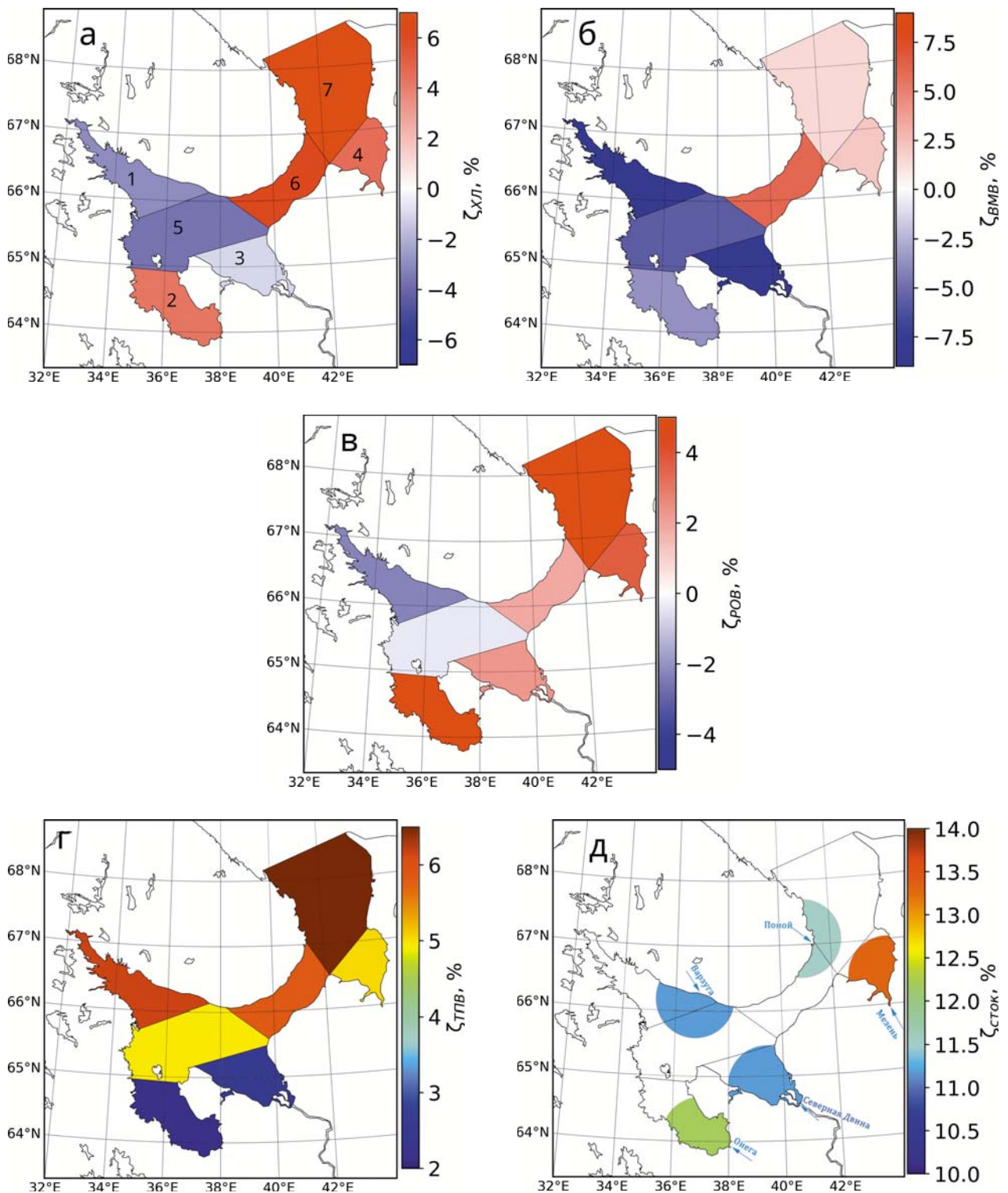


Рис. 1. Значение параметра ζ (%) по выделенным районам Белого моря в вегетационный период для параметров качества воды (ПКВ) (а – хлорофилла а, б – взвешенной минеральной взвеси, в – растворенного органического вещества), температуры поверхности воды (г) и речного стока (д) между двумя временными промежутками 2003–2011 и 2012–2020 гг. Цифрами на фрагменте а обозначены Кандалакшский (1), Онежский (2), Двинский (3), Мезенский (4) заливы, Бассейн (5), Горло (6), Воронка (7)

Fig. 1. а – ζ_{CHL} , б – ζ_{SMM} , в – ζ_{DOM} as well as г – ζ_{SST} and д – ζ_{RD} values in (%) pertaining to the identified subareas in the White Sea during the vegetation period between two time periods 2003–2011 and 2012–2020. Numbers in Fig. 1a stand for Kandalakhsky (1), Onezhsky (2), Dvinsky (3), Mezensky (4) Bays, Bassein (5), Gorlo (6), and Voronka (7)

Этот эффект в значительной мере усиливается интенсивными турбулизированными течениями над встречающимися в различных районах БМ глинистыми наносами, а также илистыми и песчаными донными отложениями соответственно абразивного и приливно-отливного происхождения. В совокупности все это снижает глубину эвфотической зоны ($Z_{эф}$), которая варьирует в БМ в диапазоне 5–15 м [Вазюля и Копелевич, 2012]. Согласно [Kravchishina et al., 2013], ниже уровня $Z_{эф}$ глубинные максимумы концентрации клеток фитопланктона в БМ не обнаруживаются, и даже в летний период концентрация ХЛ $\approx 0,05$ мкг/л.

Гидрологический режим в БМ определяется синоптическими метеорологическими условиями, водообменом с Баренцевым морем, приливами (со скоростями в заливах от ~ 1 до 9 км/ч), расходом рек и рельефом дна. Течения формируются халинными механизмами: опресненные поверхностные воды продвигаются вдоль восточных берегов моря и поступают через Горло в Баренцево море, откуда вдоль западных берегов в БМ поступают заглубленные более соленые баренцевоморские воды. Эти же механизмы формируют множественные вихревые циклонические структуры в Бассейне – центральной части БМ.

В зависимости от района характерная температура в поверхностных водах по акватории БМ составляет 9–17 °С летом и 0,5–1,7 °С зимой. Устойчивое появление льда наблюдается в ноябре–декабре, а освобождение ото льда зависит от погодных условий конкретного года.

Штормовые условия в БМ особенно характерны зимой, однако в Онежском заливе, Бассейне и Двинском заливе очень сильные ветры (>20 м/с) регистрируются и в октябре.

Методология

Алгоритмизация процедуры восстановления концентраций ПКВ

В пелагиальных океанических водах, в которых вариации интенсивности и спектрального состава светового сигнала, выходящего из-под поверхности воды ($L_{up}(\lambda)$), т. е. цвета воды, однозначно связаны с вариациями концентрации фитопланктона, стандартные одномерные регрессионные алгоритмы NASA (National Aeronautics and Space Administration) и ESA (European Space Agency) применимы для количественной оценки ХЛ, но неприменимы в этих целях в случае водоемов с гидрооптически сложными водами, примером которых является БМ. Для БМ характерны достаточно высокие

уровни первичной продукции, а также высокие концентрации растворенных и взвешенных веществ морского и водосборного происхождения, обозначенных выше как ПКВ. Поскольку ПКВ независимо друг от друга влияют на спектр дистанционно регистрируемого светового сигнала, восстановление индивидуальных концентраций ПКВ из пространственно-временных вариаций $L_{up}(\lambda)$ с использованием одномерных регрессионных алгоритмов невозможно.

Для преодоления этой сложности в работе применен алгоритм многомерной оптимизации BOREAL, основанный на методе многомерной оптимизации [Pozdnyakov et al., 2005].

Многомерное решение методом наименьших квадратов на всех длинах волн находится путем минимизации функции квадратов невязки:

$$f(C) = \sum_j g_j^2(C),$$

где $g_j = (S_j - R_{rswj})/S_j$, S_j и R_{rswj} – соответственно измеренный и рассчитанный с использованием гидрооптической модели (т. е. значений коэффициентов поглощения и рассеяния назад, отнесенных к единице концентрации ПКВ) коэффициент отражения для дистанционного зондирования $R_{rs}(\lambda)$ на длине волны λ , $C = \sum C_i$, i – ПКВ ($i = 1, 2, 3$). По определению, $R_{rs}(\lambda)$ – спектральная яркость восходящего потока непосредственно под границей раздела вода-воздух, нормированная на спектральную освещенность нисходящего потока на том же уровне [Bukata et al., 2001]. $R_{rs}(\lambda)$ рассчитывается из значений коэффициента отражения для дистанционного зондирования $R_{rs}(\lambda)$, определяемого как спектральная яркость света, исходящего из водяного столба и нормированная на спектральную освещенность (с учетом атмосферной коррекции) водной поверхности [Mobley, 1999]. $R_{rs}(\lambda)$ является стандартным продуктом основных платформ спутниковых данных цвета океана. Алгоритм BOREAL использует значения $R_{rs}(\lambda)$, получаемые из значений $R_{rs}(\lambda)$ с помощью параметризации, предложенной Lee et al. [2002].

В алгоритме BOREAL применена конечно-разностная процедура Левенберга – Марквардта [Press et al., 1992], обеспечивающая быструю сходимость итерационной процедуры при наложении априорных ограничений на диапазон варьируемых при этом значений C_i : $C_{i\min} < C_i < C_{i\max}$. В качестве последних выступают соответствующие литературные натурные данные для зондируемого водоема.

При использовании соответствующей водоему гидрооптической модели (т. е. табулированных удельных спектральных значений

коэффициентов поглощения и рассеяния назад каждого ПКВ) алгоритм BOREAL1 успешно работает для условий Ладожского и Онежского озер, Великих Американских озер, Белого, Баренцева, Карского и Берингова морей [Pozdnyakov et al., 2007, 2013; Hessen et al., 2010; Korosov et al., 2011; Petrenko et al., 2013; Kondrik et al., 2017].

В данном исследовании использовалась та же гидрооптическая модель БМ, что и в исследовании [Pozdnyakov et al., 2007], в ходе которого статистическая оценка средней ошибки поиска абсолютного минимума функции невязки $f(C)$ для каждого из ПКВ составляла около 15–20 % [Pozdnyakov et al., 2005].

Статистический подход

Поскольку в каждом временном периоде (то есть 2003–2011 и 2012–2020 гг.) у нас есть только 9 годовых данных/чисел по искомым параметрам, усредненных за вегетационный период (июнь–октябрь), использование подхода гистограмм статистического распределения было бы неуместным, а построенные по имеющимся 18 годам тренды в большинстве случаев незначимы или малоинформативны ввиду высокой межгодовой изменчивости. Вместо этого был применен подход, известный как диаграмма размаха (или «ящики с усами», англ. *box-and-whiskers diagrams*) и широко используемый в описательной статистике [Boddy, Smith, 2009].

В нашем случае временной ряд характеризуется малой длиной (18 измерений) и большой дисперсией данных (например, в некоторых случаях тренд может менять знак при исключении первой или последней точки ряда). Поскольку короткий ряд с большой дисперсией имеет малую статистическую значимость тренда, с точки зрения классической параметрической статистики оценка тренда как такового не имеет смысла.

Проведение одним и тем же выбранным методом статистического анализа значений каждого из рассматриваемых ПКВ за указанные выше два временных периода (в дальнейшем условно названные декадами) обеспечивает получение как графического описания статистического распределения полученных данных, так и возможности определения таких вспомогательных характеристик, как степень разброса/дисперсию и асимметрию данных, их средние и медианные характеристики, а также наличие сильных выбросов, являющихся наглядными индикаторами степени репрезентативности среднего значения.

Таким образом, в нашем случае большой дисперсии данных и относительно малой длины рядов имеется возможность оценки методом диаграмм размаха изменения (параметр ζ , здесь и далее в %) среднеарифметических значений по пространству и времени каждого из ПКВ (ХЛ, ВМВ и РОВ), а также влияющих факторов в период с первой (2003–2011 гг.) по вторую (2012–2020 гг.) декаду. Параметр ζ рассчитывается как разница в процентах между значениями ПКВ, ТПВ и стока рек в первой и второй декадах: $\zeta_x = (X_2 - X_1) / X_1 \cdot 100 \%$, где X – один из исследуемых параметров (ХЛ, ВМВ, РОВ, ТПВ, СР), а X_1 и X_2 – средние значения исследуемого параметра за первую и вторую декаду соответственно.

Совместное рассмотрение диаграмм динамики ПКВ и факторов окружающей среды дает возможность их визуального сравнения и выявления наличия или отсутствия влияния одних на другие на фоне происходящих климатических изменений.

Данные и их обработка

Значения $S(\lambda)$ за март–октябрь 2003–2020 гг. были рассчитаны с использованием прошедшей процедуру атмосферной коррекции данных датчика MODIS Aqua, уровня обработки L2, по $R_{rs}(\lambda)$ из единичных спутниковых изображений исключительно только открытой водной поверхности в спектральных каналах 412, 443, 488, 531, 555 и 667 нм.

Пространственные распределения концентраций ПКВ в БМ восстановлены алгоритмом BOREAL1 и репроецировались на прямоугольную сетку. Длина стороны пикселя была рассчитана на основе предположения, что одна координатная минута на поверхности моря соответствует 1852 м по широте и долготе. На юге и севере акватории моря длины сторон пикселя составили (1 и 1,1) и (1 и 0,9) км соответственно.

Ежедневные репроецированные изображения усреднялись, и методом экспертной оценки отфильтровывались изображения пространственного распределения ПКВ, если хотя бы у одного ПКВ обнаруживались нереалистично высокие значения, покрывающие нереалистично протяженные участки моря. Это требовалось, например, в период арктического лета при очень низком положении Солнца, когда данные, прошедшие автоматическую процедуру проверки NASA L2 и обработанные алгоритмом BOREAL1, приводили к неадекватно высоким значениям ПКВ (в разы или даже на порядок выше соответствующих значений в снимке).

Усреднение для каждого пикселя выполнялось как суммирование/наложение ежедневных изображений, прошедших вышеуказанную проверку качества. Средние ежемесячные изображения представляют собой мозаику усредненных пикселей за пикселем ежедневных изображений, полученных за один месяц. В случае отсутствия данных в пикселе интерполяция не производилась. Усреднение среднемесячных изображений для получения среднеклиматических изображений выполнено путем суммирования/наложения среднемесячных изображений, полученных для каждой декады, т. е. 2003–2011 и 2012–2020 гг.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 для периода между двумя декадами 2003–2011 и 2012–2020 гг. даны пространственные распределения по выделенным районам БМ значений параметра ζ (см. раздел «Статистический подход») по каждому из исследуемых показателей (ПКВ, ТПВ и РС). Возможность такого представления результатов в виде закрашенных площадей БМ цветом, приписанным соответствующему значению и знаку параметра ζ , без одновременной визуализации информации по соответствующим медианам, квартилям и выбросам обусловлена тем, что по совокупному анализу диаграмм размаха по всем искомым показателям выясняется, что в подавляющем числе случаев (более 75 %) медианные и средние значения однообразно демонстрируют существенное падение значения исследуемого показателя (например ХЛ, как представлено на рис. 2, а). В остальных ~25 % случаев значения параметра ζ оказываются незначительными (рис. 2, б).

Это позволяет условно принять отсутствие значимых изменений во вспомогательных статистических характеристиках репрезентативности среднего значения.

Обнаружено, что в обширных районах БМ в течение вегетационного периода произошло небольшое снижение концентрации ХЛ: значение параметра $\zeta_{\text{ХЛ}}$ (%) снизилось до $-1...-4$ в Кандалакшском и Двинском заливах, а также в Бассейне. В то же время параметр $\zeta_{\text{ХЛ}}$ вырос в пределах $4-6$ в Онежском и Мезенском заливах и Горле и до 8 в Воронке. Одновременно концентрации ВМВ снизились в Кандалакшском, Онежском ($\zeta_{\text{ВМВ}} \approx -17$) и особенно Двинском ($\zeta_{\text{ВМВ}} \approx -23$) заливах, а также в Бассейне, но умеренно выросли в Мезенском заливе, Воронке и Горле ($1,5 < \zeta_{\text{ВМВ}} < 6$). За исключением Кандалакшского залива и Бассейна (значения $\zeta_{\text{РОВ}}$ попали в диапазон $-0,4...-2,3$) концентрация РОВ выросла, особенно в Онежском заливе ($\zeta_{\text{РОВ}} \approx 6$) и Воронке ($\zeta_{\text{РОВ}} \approx 10$).

Указанные междекадные изменения с ПКВ произошли на фоне сдвига того же порядка погоднo-климатических условий. В сочетании с динамикой ТПВ изменения СР ожидаемо свидетельствуют о потеплении климата в регионе БМ. Действительно: за этот временной промежуток ТПВ выросла в среднем за вегетационный период во всех районах БМ (значения $\zeta_{\text{ТПВ}}$ оказались в диапазоне $2...6$), а с марта по октябрь сток основных рек (см. раздел «Объект исследования») увеличился со значениями $\zeta = 11-13$.

Картина изменений более пестрая на внутрисезонном уровне в отношении как ПКВ, так и ТПВ и СР. Максимальное междекадное снижение ХЛ оказалось в июне, особенно в Кандалакшском и Двинском заливах ($\zeta_{\text{ХЛ}} \approx -10$

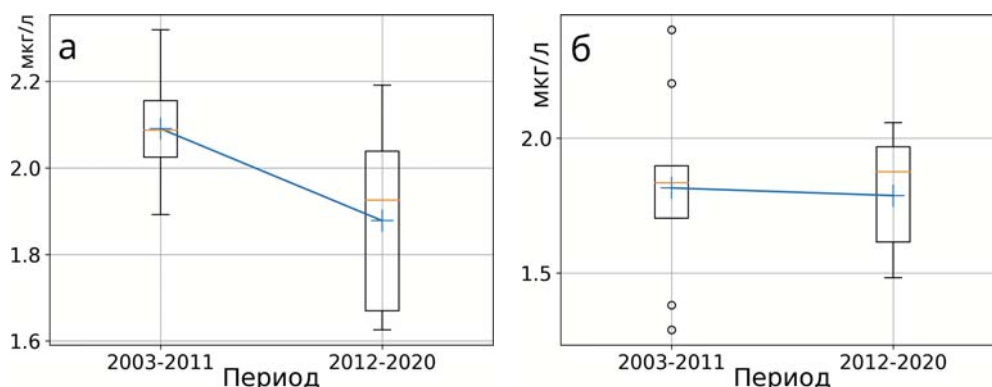


Рис. 2. Диаграммы размаха для хлорофилла а в Кандалакшском заливе Белого моря: а – июнь, б – август

Fig. 2. Box-and-whiskers diagrams for CHL in the Kandalaksha Bay of the White Sea: а – June, б – August

и ~ 7 соответственно) и в Бассейне ($\zeta_{\text{ХЛ}} \approx -10$), а также в октябре, особенно в Кандалакшском, примерно одинаково в Двинском и Мезенском заливах ($\zeta_{\text{ХЛ}} > -30$ и ≈ -10 соответственно) и Горле ($\zeta_{\text{ХЛ}} > -13$).

За исключением августа в остальные месяцы уровни ВМВ и РОВ также существенно снизились: так, в июне в Кандалакшском заливе $\zeta_{\text{ВМВ}} > -30$, $\zeta_{\text{РОВ}} > -14$, в октябре $\zeta_{\text{ВМВ}} > -30$ и $\zeta_{\text{РОВ}} = -24$. В сентябре снижение ВМВ происходило во всех районах БМ ($-13 < \zeta_{\text{ВМВ}} < -50$). За исключением Онежского залива имело место повсеместное значительное снижение и РОВ ($-9,5 < \zeta_{\text{РОВ}} < -24$).

Примечательно, что в августе, за исключением очень незначительного снижения ХЛ ($\zeta_{\text{ХЛ}} \approx -1,6$), остальные два ПКВ показали заметный рост: $4,6 < \zeta_{\text{ВМВ}} < 7,5$; $6,0 < \zeta_{\text{РОВ}} < \sim 17$.

Указанные помесечные вариации $\zeta_{\text{ПКВ}}$ происходили на фоне изменений $\zeta_{\text{ТГВ}}$ на уровне, не превышающем $< \pm 10$. Однако в июне значения $\zeta_{\text{ПКВ}}$ оказались только положительными и существенно выше по величине: > 15 в Онежском и Двинском заливах, а в Бассейне, Кандалакшском и Мезенском заливах составили соответственно 31,7; 36,8 и 57,7.

Параметр СР помесечно оставался положительным с августа по октябрь, что особенно проявилось в августе ($22 < \zeta_{\text{СР}} < 80$) и, хотя и в меньшей степени, в октябре ($\sim 3 < \zeta_{\text{СР}} < 33$). В июне $\zeta_{\text{СР}}$ принимал отрицательные значения в пределах, не превышающих -10 , в случае рек Двина, Мезень и Онега, а в июле это происходило в таких же пределах на реках Двина и Варзуга.

Полученные нами усредненные по каждому из двух временных периодов помесечные пространственные распределения самих значений ХЛ, ВМВ и РОВ свидетельствуют (рис. 3), что их общий характер не претерпел больших изменений и с наступлением теплого периода; именно прибрежная зона по всему периметру БМ преимущественно являлась основной зоной активной сезонной динамики параметров ПКВ. Однако по мере прогревания поверхностных вод с конца июля – начала августа эта зона начинала расширяться, распространяясь и на пелагиальные воды БМ. Постоянство этой схемы/последовательности подтверждается и другими спутниковыми наблюдениями, проведенными в течение 1998–2011 гг. Помимо этого, рис. 3 свидетельствует о расширении в 2012–2020 гг. зон со значениями ПКВ, нехарактерно высокими для БМ в предыдущие годы и тем более десятилетия [Filatov et al., 2005; Pozdnyakov et al., 2007; Kravchishina et al., 2013].

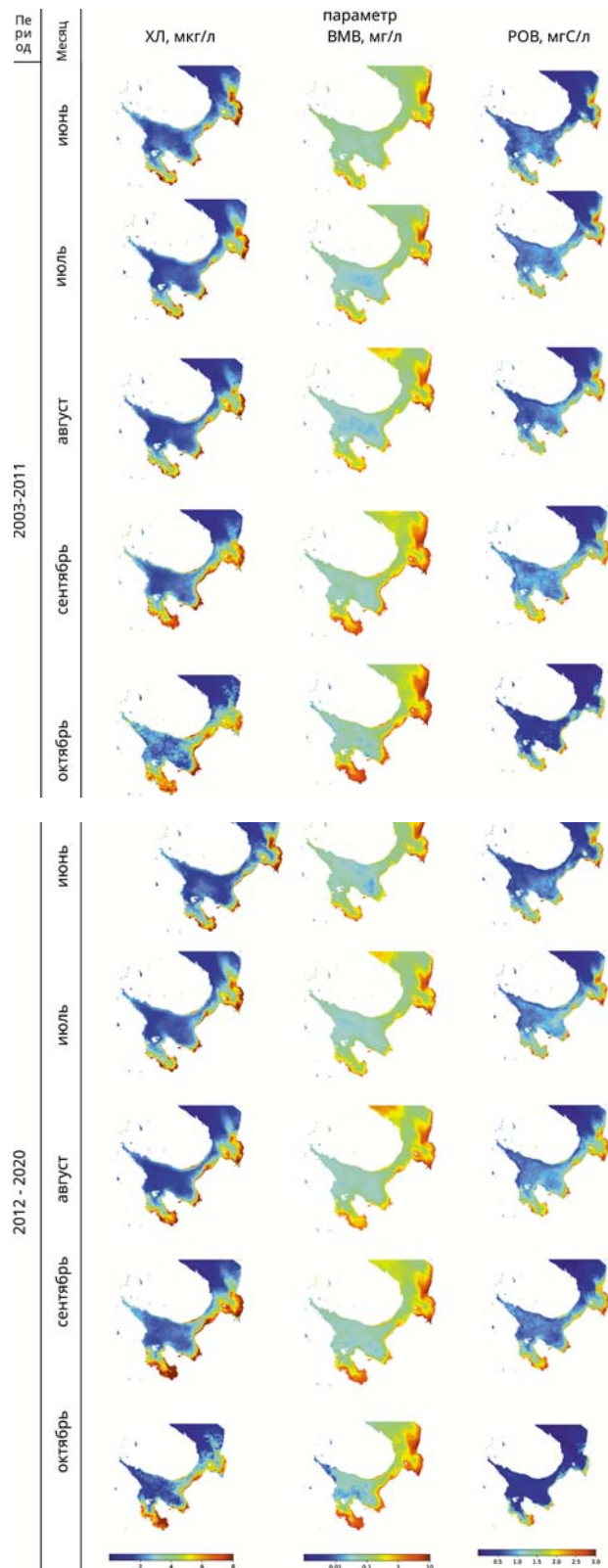


Рис. 3. Помесечные пространственные распределения параметров качества воды в Белом море в периоды 2003–2011 и 2012–2020 гг. по спутниковым данным

Fig. 3. Satellite data on monthly mean maps of WQP in the White Sea for the time periods 2003–2011 and 2012–2020

Кандалакшский залив. Глубоководность залива (максимальные глубины превышают 300 м при средних 50–60 м), беспрепятственный по всей толще воды водообмен с Бассейном, а также низкий уровень стока впадающих небольших рек в совокупности определяют характерные для него условия формирования уровня первичного продуцирования. При высокой для БМ прозрачности вод ($Z_{эф} = 10–15$ м), относительной холодноводности залива (в глубоководных районах максимальная ТПВ наблюдается в июле и не превышает $15\text{ }^{\circ}\text{C}$) и малом поступлении аллохтонных биогенов первичная продуктивность уступает даже мелководным районам Онежского залива [Максимова, Чугайнова, 2014].

С учетом сказанного снижение уровня первичного продуцирования ($\zeta_{хл} \approx -3$) во второй декаде в течение всего вегетационного периода ($\zeta_{хл} \approx -3$), особенно в октябре ($\zeta_{хл} \approx -33$), на фоне роста $\zeta_{тпв}$ до ~ 6 и повышения прозрачности вод ($\zeta_{вмв} > 17$) было обусловлено зарегистрированным нами пониженным уровнем фотосинтетически активной радиации (ФАР) ($\zeta_{фар} > -3$), а также, возможно, дефицитом биогенов аллохтонного происхождения.

Сказанное выше о динамике ХЛ в первой и второй декадах отчетливо иллюстрируется и пространственно-временными распределениями всех трех параметров ПКВ на рис. 3.

Онежский залив. По сравнению с некоторыми другими областями БМ (рис. 1) зарегистрированный рост концентрации ХЛ за весь вегетационный период и, следовательно, первичной продуктивности в 2012–2020 гг. отмечен относительно невысоким значением показателя $\zeta_{хл}$ (чуть выше 4). Причина этого обусловлена прежде всего величиной исходной базы отсчета: уровень ХЛ и так был высоким в 2003–2011 гг. Благодаря преобладающей мелководности (глубины в диапазоне от 5 до 25–30 м) и в известной мере изолированности от центральной части моря грядой Соловецких островов залив хорошо прогревается и для него были характерны повышенные уровни ХЛ на всем протяжении наблюдений. Указанному росту ХЛ во второй декаде способствовали рост температуры воды за вегетационный период ($\zeta_{тпв} = 2,1$), особенно в июне–сентябре ($\zeta_{тпв} \approx 16$ и $7,5$ соответственно), и стока одноименной реки ($\zeta_{сп} = 16$). Последнее обстоятельство обусловило усиление притока биогенов, а также снижение уровня взмученности воды ($\zeta_{вмв} \approx -4$) и, как следствие, определенное увеличение глубины эвфотического слоя, которое, однако, в значительной мере оказалось компенсированным повышением уровня аллохтон-

ного РОВ (рис. 1), а также снижением зарегистрированного нами поступления ФАР ($\zeta_{фар} \approx -3$). В пространственном распределении повышенный уровень ХЛ (рис. 3) приурочен к особо мелководным и наиболее благоприятным для продуцирования районам залива, т. е. к дельте р. Онега и протяженной зоне вдоль западного побережья, где расположены многочисленные мелкие острова.

В мелководном Онежском заливе (средняя глубина ~ 50 м) сильные приливные течения и интенсивное вертикальное турбулентное перемешивание вод приводят к вертикальной гомотермии и гомогалинности на большей части акватории залива, благодаря чему в центральной его части распределение ХЛ по поверхности более равномерно и снижено по величине. На выходе из залива на рис. 3 обнаруживается особо низкопродуктивная область, обусловленная постоянным апвеллингом у Соловецких островов.

Двинский залив. Со средними глубинами до 50 м (при наличии на севере глубин до 120 м и относительного мелководья на юге) этот залив, хотя и замерзающий зимой, после Онежского залива – самая теплая, но отнюдь не самая продуктивная часть БМ (рис. 3). На фоне незначительного увеличения ТПВ во второй декаде (в вегетационный период $\zeta_{тпв} = 2,5$, а в некоторые месяцы < 0), роста $\zeta_{сп}$ за март–октябрь в среднем до значения 13, разнонаправленного в некоторые внутрисезонные периоды изменения показателей ζ для МВ и РОВ, уровень первичной продуктивности в среднем за вегетационный период также не претерпел существенных изменений ($\zeta_{хл} = -1$), практически оставив его на уровне 2003–2011 гг.

Мезенский залив. Замерзающий зимой, практически повсеместно мелководный (средняя глубина 13 м), с обширной ультрамелководной зоной (~ 5 м), с низкой прозрачностью, обусловленной поступлением мутных вод наиболее полноводной одноименной реки, являющийся зоной высокой амплитуды (до 11 м) приливо-отливных изменений уровня воды, тем не менее отличается довольно высоким значением ХЛ в акватории БМ. За вторую декаду в вегетационный период все показатели продемонстрировали умеренный рост в несколько процентов. Согласованная по знаку динамика ПКВ дает основание предполагать, что именно динамика речного стока в этом временном периоде явилась важным фактором роста ХЛ. Но на фоне увеличения ТПВ (за вегетационный сезон $\zeta_{тпв} = 5$, а в июне составил почти 60) увеличение стока (рис. 1) привело не только к увеличению мутности воды и содержания РОВ,

но и к притоку биогенов. Подтверждением этому является характер пространственно-временного распределения ПКВ: градиент их концентраций явно направлен от дельты р. Мезень к северной границе залива и за ее пределы (рис. 3).

Бассейн. На фоне роста ТПВ во второй декаде за вегетационный период ($\zeta_{\text{ТПВ}} = 5$) и снижения уровня ХЛ ($\zeta_{\text{ХЛ}} \approx -4$) за тот же период произошло согласованное по знаку понижение концентрации двух других параметров ПКВ: $\zeta_{\text{ВМВ}} \approx -6$ и $\zeta_{\text{РОВ}} < -1$ (рис. 1). Можно полагать, что в этой глубоководной части БМ причиной ухудшения условий первичного продуцирования стало, по пока неясным причинам, снижение поступления речных вод (несущих взвешенное минеральное и растворенное вещество и биогены), а также зарегистрированное нами снижение во второй декаде уровня ФАР ($\zeta_{\text{ФАР}} \approx -3$) в этом районе.

Горло. Благодаря преобладающей циклонической циркуляции поверхностных вод БМ [Filatov et al., 2005] в эту относительно узкую в меридиональном направлении область из Онежского и Двинского заливов направляются водные потоки с высоким уровнем биогенов аллохтонного происхождения. Произошедший в 2012–2020 гг. рост $\zeta_{\text{ТПВ}}$ и $\zeta_{\text{СР}}$, а также зарегистрированное нами практически неизменное с предыдущей декады значение ФАР ($\zeta_{\text{ФАР}} < -1$) обусловили рост первичного продуцирования и продвижение с июля по сентябрь области повышенных значений ХЛ в северной литоральной зоне. Примечательно, однако, что во второй декаде вегетационный сезон в Горле закончился в октябре, т. е. на месяц раньше, чем в предыдущее десятилетие, несмотря на то, что значение $\zeta_{\text{ТПВ}}$ продолжало расти в сентябре и практически осталось в октябре на уровне предыдущего десятилетия.

В Воронке динамика ХЛ, свойств водной среды (ТПВ, СР) и зарегистрированного нами повышенного (относительно предыдущей декады) уровня ФАР ($\zeta_{\text{ФАР}} \approx 3$) в 2012–2020 гг. оказалась аналогична той, что имела место в Горле. В условиях устойчивой циклонической циркуляции поверхностных вод увеличение притока биогенов в результате возросшего в этот период стока и без того полноводной р. Мезень, а также р. Поной, резкое (в процентном отношении, но не в абсолютных значениях) потепление поверхностных вод в этой области (рис. 1) в совокупности могли обеспечить зарегистрированное за вегетационный период увеличение уровня ХЛ во второй декаде. Логично, что благодаря циклонической циркуляции (преимущественно приуроченной

по всему БМ к южной части литоральной зоны) наиболее отчетливо увеличение ХЛ проявилось именно в северо-восточной части Горла (рис. 3).

Заключение

Основанные на восстановлении спутниковых данных наши данные свидетельствуют, что по сравнению с 2003–2011 гг. первичная продуктивность, оцененная по уровню ХЛ, в 2012–2020 гг. в Онежском и Мезенском заливах, а также в Воронке и Горле выросла в целом за вегетационный сезон, и этот рост $\zeta_{\text{ХЛ}}$ оказался в диапазоне лишь 4–8 %. При этом в Кандалакшском заливе и Бассейне первичная продуктивность даже снизилась: $\zeta_{\text{ХЛ}} \sim -3 \dots \sim -4$ %).

Учитывая относительно невысокие в процентном отношении значения произошедших за временной период 2003–2020 гг. изменений $\zeta_{\text{ХЛ}}$, можно констатировать, что серьезных сдвигов в уровне продуктивности БМ не произошло и наблюдаемые изменения первичной продуктивности относительно невелики. Рост ТПВ (в диапазоне $2 \% < \zeta_{\text{ТПВ}} < \sim 7$ %) свидетельствует тем не менее о потеплении климата в районе БМ. Увеличение стока основных рек БМ суммарно за март–октябрь ($11 < \zeta_{\text{СР}} < 13$ %) и обусловленное этим увеличение уровня РОВ ($\sim 2 < \zeta_{\text{РОВ}} < 10$ %) идет в русле происходящего климатического сдвига.

Таким образом, отсутствие в условиях умеренно меняющихся таких естественных факторов окружающей среды, как СР, ТПВ, ФАР, признаков мультипликативного эффекта в динамике первичного продуцирования дает основание полагать, что в современных условиях антропогенной нагрузки экологическая система БМ остается еще довольно устойчивой и в течение 2003–2020 гг. не демонстрирует признаков резкой дестабилизации.

В силу ограниченного числа вовлеченных в рассмотрение факторов окружающей среды проведенный нами анализ причин междекадной динамики ПКВ, и прежде всего ХЛ, конечно, не является исчерпывающим. В частности, сведения о видовом составе фитопланктона и содержании биогенных веществ в воде могли бы способствовать раскрытию причин разнонаправленных изменений в экосистемах отдельных частей БМ. На данном этапе исследование является шагом к планируемому проведению такого специального исследования, но уже на более продвинутом вперед временном ряде.

Авторы благодарят за помощь в подготовке статьи А. Ю. Демченко.

Литература

Вазюля С., Копелевич О. Сравнительная оценка баланса фотосинтетически активной радиации в Баренцевом, Карском и Черном морях по данным судовых и спутниковых измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 5(4). С. 47–53.

Кашулин Н. А., Беккелунд А. К. Изменения климата и цветение арктического озера Имандра // *Биосфера*. 2022. Т. 14(2). С. 99–125. doi: 10.24855/biosfera.v14i2.6763

Копелевич О. В., Салинг И. В., Вазюля С. В., Глуховец Д. И., Шеберстов С. В., Буренко В. И., Каралли П. Г., Юшманов А. В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. М.: Ваш формат, 2018. 140 с.

Максимова М., Чугайнова В. Гидрохимический и гидрологический режим прибрежной зоны Белого моря. Марикультура. М.: ИИУ МГОУ, 2014. 200 с.

Серых И. В., Толстиков А. В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 1. Температура воздуха, осадки, ветер // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022. Т. 68(3). С. 258–277. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277

Тишкова А. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Морозова О. В., Пузаченко А. Ю., Тertiцкий Г. М., Титов С. В. Биотически значимые тренды климата и динамика биоты Российской Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 1(33). С. 71–85. doi: 10.25283/2223-4594-2019-1-71-87

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р., Ожигина В. Н., Богдан М. И. Изменение и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты // *Арктика. Экология и экономика*. 2012. № 2(6). С. 80–94.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Дружинин П. В. Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние системы «Белое море – водосбор» // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2019. № 9. С. 30–50. doi: 10.17076/lim1117

Ardyna M., Arrigo K. R. Phytoplankton dynamics in a changing Arctic Ocean // *Nat. Clim. Change*. 2020. Vol. 10. P. 892–903. doi: 10.1038/s41558-020-0905-y

Boddy R., Smith G. Statistical methods in practice: for scientists and technologists. John Wiley and Sons, 2009. 29 p.

Bukata R., Jerome J., Kondratyev K., Pozdnyakov D. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. New York: CRC Press, 1995. 362 p.

Bukata R. P., Pozdnyakov D. V., Jerome J. H., Tanis F. J. Validation of a radiometric color made applicable to optically complex water // *Remote Sens. Environ.* 2001. Vol. 77(2). P. 165–172.

Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen O. M., Pettersson L., Bobylev L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Chichester: Springer Praxis, 2005. 472 p.

Frolova A. V., Morozov E. A., Pozdnyakov D. V. The Arctic Ocean primary production in response to amplification of climate change: insights from 2003–2022 satellite data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic*

Physics. 2023. Vol. 59(12). P. 196–204. doi: 10.1134/S0001433823120095

Hessen D. O., Carroll J.-L., Kjeldstad B., Korosov A. A., Pettersson L. H., Pozdnyakov D. V., Sørensen K. Input of organic carbon as determinant of nutrient fluxes, light climate and productivity in the Ob and Yenisey estuaries // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2010. Vol. 88(1). P. 53–62. doi: 10.1016/J.ECSS.2010.03.006

Ilyash L. V., Belevich T. A., Zhitina L. S., Radchenko I. G., Ratkova T. N. Phytoplankton of the White Sea // *Biogeochemistry of the Atmosphere, Ice and Water of the White Sea / Lisitsyn A., Gordeev V. (eds.). The Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 81. Cham: Springer, 2018. P. 187–222. doi: 10.1007/698_2018_320

Kondrik D. V., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H. Particulate inorganic carbon production within *E. huxleyi* blooms in subpolar and polar seas: a satellite time series study (1998–2013) // *Int. J. Remote Sens.* 2017. Vol. 38(22). P. 6179–6205. doi: 10.1080/01431161.2017.1350304

Korosov A. A., Pozdnyakov D., Grassl H. Speceborne quantitative assessment of dissolved organic carbon fluxes in the Kara Sea // *Advances in Space Research. Special Issue: Oceanography, Cryosphere and Freshwater Flux to the Ocean*. 2012. Vol. 50. P. 1173–1188. doi: 10.1016/j.asr.2011.10.008

Kravchishina M., Burenkov V., Kopelevich O., Sheberstov S., Vazulya S., Lisitzin A. New data on the spatial and temporal variability of the chlorophyll a concentration in the White Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2013. Vol. 48(1). P. 120–125. doi: 10.1134/S1028334X13010170

Lee Z., Carder K. L., Arnone R. A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters // *Applied Optics*. 2002. Vol. 41(27). P. 5755–5772. doi: 10.1364/AO.41.005755

Malysheva A. S., Radchenko I. V., Pozdnyakov D. V. Arctic ocean acidification dynamics during 1993–2021 and its projections for the rest of this century // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023. Vol. 16(4). P. 63–74. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-5

Mobley C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // *Applied Optics*. 1999. Vol. 38(36). P. 7442–7455. doi: 10.1364/AO.38.007442

Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J., Counillon F., Syrov V. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean // *Int. J. Remote Sens.* 2013. Vol. 34(11). P. 3903–3937. doi: 10.1080/01431161.2012.762698

Pozdnyakov D. V., Johannessen O. M., Korosov A. A., Pettersson L. H., Grassl H., Miles M. W. Satellite evidence of ecosystem changes in the White Sea: A semi-enclosed arctic marginal shelf sea // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 4(8). Art. L08604. doi: 10.1029/2006GL028947

Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Grassl H., Pettersson L. H. An advanced algorithm for operational retrieval of water quality from satellite data in the visible // *Int. J. Remote Sens.* 2005. Vol. 26(12). P. 2669–2687.

Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Petrova N. A., Grassl H. Multi-year satellite observations of Lake Ladoga's biogeochemical dynamics in relation to the lake's trophic status // *Journal of Great Lakes Research*. 2013. Vol. 39, Suppl. 1. P. 34–45. doi: 10.1016/j.jglr.2013.05.002

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes in C: the art of scientific computing, 2nd ed., New York: Cambridge Univ. Press, 1992. 452 p.

Roy S., Llewellyn C. A., Egeland E., Johnsen G. (eds.). Phytoplankton pigments. Characterization, chemotaxonomy and applications in oceanography. Cambridge Univ. Press, 2011. 845 p.

Sergeeva V. V., Sukhanova I. N., Flint M. V., Polukhin A. A., Klemenetsky V. V., Fedorov A. V. Phytoplankton of the St. Anna Trough: influence of abiotic factors // *Oceanology*. 2020. Vol. 60. P. 458–472. doi: 10.1134/S0001437020040207

Sokoletsky L. G., Lunetta R. S., Wetz M. S., Paerl H. Assessment of the water quality components in turbid estuarine waters based on radiative transfer approximations // *Isr. J. Plant Sci.* 2012. Vol. 60(1–2). P. 209–229. doi: 10.1560/IJPS.60.1-2.209

References

Ardyna M., Arrigo K. R. Phytoplankton dynamics in a changing Arctic Ocean. *Nat. Clim. Change*. 2020; 10:892–903. doi: 10.1038/s41558-020-0905-y

Boddy R., Smith G. Statistical methods in practice: for scientists and technologists. John Wiley and Sons; 2009. 29 p.

Bukata R., Jerome J., Kondratyev K., Pozdnyakov D. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. New York: CRC Press; 1995. 362 p.

Bukata R. P., Pozdnyakov D. V., Jerome J. H., Tannis F. J. Validation of a radiometric color made applicable to optically complex water. *Remote Sens. Environ.* 2001;77(2);165–172.

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R., Ozhigina V. N., Bogdan M. I. Climate change and variability in the European North of Russia and their impact on water bodies. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2012;2(6):80–94. (In Russ.)

Filatov N. N., Nazarova L. E., Druzhinin P. V. Influence of climatic and anthropogenic factors on the White Sea - catchment system. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;9:30–50. doi: 10.17076/lim1117

Filatov N., Pozdnyakov D., Johsannessen O. M., Petterssen L., Bobylev L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Chichester: Springer Praxis; 2005. 472 p.

Frolova A. V., Morozov E. A., Pozdnyakov D. V. The Arctic Ocean primary production in response to amplification of climate change: insights from 2003–2022 satellite data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023;59(12):196–204. doi: 10.1134/S0001433823120095

Hessen D. O., Carroll J.-L., Kjeldstad B., Korosov A. A., Pettersson L. H., Pozdnyakov D. V., Søren-

sen K. Input of organic carbon as determinant of nutrient fluxes, light climate and productivity in the Ob and Yenisey estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2010;88(1):53–62. doi: 10.1016/J.ECSS.2010.03.006

Ilyash L. V., Belevich T. A., Zhitina L. S., Radchenko I. G., Ratkova T. N. Phytoplankton of the White Sea. *Biogeochemistry of the Atmosphere, Ice and Water of the White Sea. The Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 81. Cham: Springer; 2018. P. 187–222. doi: 10.1007/698_2018_320

Kashulin N. A., Bekkelund A. K. Climate changes and algal bloom in the Arctic Lake Imandra. *Biosfera*. 2022;14(2):99–125. (In Russ.). doi: 10.24855/biosfera.v14i2.6763

Kondrik D. V., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H. Particulate inorganic carbon production within *E. huxleyi* blooms in subpolar and polar seas: a satellite time series study (1998–2013). *Int. J. Remote Sens.* 2017;38(22):6179–6205. doi: 10.1080/01431161.2017.1350304

Kopelevich O. V., Saling I. V., Vazyulya S. V., Glukhovets D. I., Sheberstov S. V., Burenko V. I., Karalli P. G., Yushmanov A. V. Biooptical characteristics of the seas washing the coasts of the western part of Russia, according to satellite colour scanners in 1998–2017. Moscow: Vash format; 2018. 140 p. (In Russ.)

Korosov A. A., Pozdnyakov D., Grassl H. Spaceborne quantitative assessment of dissolved organic carbon fluxes in the Kara Sea. *Advances in Space Research. Special Issue: Oceanography, Cryosphere and Freshwater Flux to the Ocean*. 2012;50:1173–1188. doi: 10.1016/j.asr.2011.10.008

Kravchishina M., Burenkov V., Kopelevich O., Sheberstov S., Vazyulya S., Lisitzin A. New data on the spatial and temporal variability of the chlorophyll a concentration in the White Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2013;48(1):120–125. doi: 10.1134/S1028334X13010170

Lee Z., Carder K. L., Arnone R. A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*. 2002;41(27):5755–5772. doi: 10.1364/AO.41.005755

Maksimova M., Chugainova V. Hydrochemical and hydrological regime of the coastal zone of the White Sea. Mariculture. Moscow: IIU MGOU; 2014. 200 p. (In Russ.)

Malysheva A. S., Radchenko I. V., Pozdnyakov D. V. Arctic ocean acidification dynamics during 1993–2021 and its projections for the rest of this century. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023;16(4): 63–74. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-5

Mobley C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*. 1999;38(36):7442–7455. doi: 10.1364/AO.38.007442

Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J., Counillon F., Syrov V. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean. *Int. J. Remote Sens.* 2013;34(11):3903–3937. doi: 10.1080/01431161.2012.762698

Pozdnyakov D. V., Johannessen O. M., Korosov A. A., Pettersson L. H., Grassl H. G., Miles M. W.

Satellite evidence of ecosystem changes in the White Sea: A semi-enclosed arctic marginal shelf sea. *Geophys. Res. Lett.* 2007;4(8):L08604. doi: 10.1029/2006GL028947

Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Grassl H., Pettersson L. H. An advanced algorithm for operational retrieval of water quality from satellite data in the visible. *Int. J. Remote Sens.* 2005;26(12):2669–2687.

Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Petrova N. A., Grassl H. Multi-year satellite observations of Lake Ladoga's biogeochemical dynamics in relation to the lake's trophic status. *Journal of Great Lakes Research.* 2013;39(1):34–45. doi: 10.1016/j.jglr.2013.05.002

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes in C: the art of scientific computing, 2nd ed. New York: Cambridge Univ. Press; 1992. 452 p.

Roy S., Llewellyn C. A., Egeland E., Johnsen G. (eds.). Phytoplankton pigments. Characterization, chemotaxonomy and applications in oceanography. Cambridge Univ. Press; 2011. 845 p.

Sergeeva V. V., Sukhanova I. N., Flint M. V., Polukhin A. A., Klemenetsky V. V., Fedorov A. V. Phytoplankton of the St. Anna Trough: influence of abiotic

factors. *Oceanology.* 2020;60:458–472. doi: 10.1134/S0001437020040207

Serykh I. V., Tolstikov A. V. Climate changes in the Western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 1. Air temperature, precipitation, and wind. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research.* 2022;68(3):258–277. (In Russ.). doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277

Sokoletsky L. G., Lunetta R. S., Wetz M. S., Paerl H. Assessment of the water quality components in turbid estuarine waters based on radiative transfer approximations. *Isr. J. Plant Sci.* 2012;60(1–2):209–229. doi: 10.1560/IJPS.60.1-2.209

Tishkov A. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Morozova O. V., Puzachenko A. Yu., Tertitskii G. M., Titov S. V. Biotic significant climate trends and biota dynamics of the Russian Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy.* 2019;1(33):71–85. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2019-1-71-87

Vazyulya S. V., Kopelevich O. V. Comparative estimates of the budget of Photosynthetic Available Radiation (PAR) in the Barents, White, Kara and Black Seas derived from *in situ* and satellite data. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics.* 2012;5(4):47–53. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 21.07.2025; принята к публикации / accepted: 05.02.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Морозов Евгений Александрович

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
отдела дистанционных методов исследований

e-mail: frisman@list.ru

Поздняков Дмитрий Викторович

д-р физ.-мат. наук, профессор, заместитель директора
по науке, руководитель группы водных экосистем

e-mail: dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru

CONTRIBUTORS:

Morozov, Evgeny

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Pozdnyakov, Dmitry

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Full Professor, Deputy Director
for Science, Group Head

УДК 504.064.2.001.18

ОЦЕНКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНОГО УРОВНЯ

А. С. Нартов*, М. А. Лаврухина

Государственный университет по землеустройству (ул. Казакова, 15, Москва, Россия, 105064), *nartovalexander@gmail.com

Рассмотрен авторский метод эквивалентного уровня, разработанный для оценки качества воды Рыбинского водохранилища, а также применимый к прогнозированию негативных экологических последствий, которые с высокой вероятностью следует ожидать в случае реализации проектов по восстановлению земель, утраченных при создании водохранилища. Показано, что зависимости концентраций ряда неорганических ионов и нефтепродуктов в водоеме от уровня его заполнения близки к убывающей экспоненциальной регрессии. Для 12 гидрохимических показателей графически определены коэффициенты регрессий, статистическая значимость которых подтверждена путем расчета критериев Фишера и Стьюдента. Выявленные зависимости использованы для расчета предельных эквивалентных уровней, ниже которых наступают экологические последствия, сравнимые с превышением ПДК. Показано, что при изучении динамики гидрохимических параметров водоема важную роль играет скорость изменения концентрации химических веществ вследствие изменения уровня воды. Проведены расчеты скорости возрастания концентрации 12 гидрохимических показателей при прохождении отметки нормального подпорного уровня (НПУ) Рыбинского вдхр. (101,81 м БС). Максимальное значение наблюдается для катионов Mn^{2+} (единственный из показателей, для которого скорость превышает 1 ПДК/м). Прогнозирование изменения качества воды Рыбинского вдхр., выполненное на основе разработанной методики, дает основания полагать, что реализация проектов по частичному осушению затопленных земель посредством снижения НПУ водоема до отметки 98 м БС приведет к превышению рыбохозяйственных ПДК по девяти из 12 веществ, тогда как в течение 2018–2024 гг. нормы превышали только четыре показателя, что указывает на нецелесообразность воплощения подобных проектов. Отдельно рассмотрены процессы поступления в водоем Mn^{2+} и $Fe_{общ}$, поскольку, согласно имеющимся исследованиям, превышение по этим элементам фиксируется и в других водохранилищах, но зачастую связано с особенностями региональной геохимии. Рассмотрен сценарий, при котором уровень водоема будет зафиксирован на постоянной отметке в течение длительного времени. Сделаны предположения, что в этом случае будет стабильно наблюдаться пониженное качество воды.

Ключевые слова: Рыбинское водохранилище; качество воды; эквивалентный уровень; тяжелые металлы; анионы; восстановление земель

Для цитирования: Нартов А. С., Лаврухина М. А. Оценка гидрохимических показателей Рыбинского водохранилища с применением метода эквивалентного уровня // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 111–124. doi: 10.17076/lim2300

A. S. Nartov*, M. A. Lavrukhina. ASSESSMENT OF HYDROCHEMICAL INDICATORS OF THE RYBINSK RESERVOIR USING THE EQUIVALENT LEVEL METHOD

State University of Land Use Planning (15 Kazakova St., 105064 Moscow, Russia),
*nartovalexander@gmail.com

The article discusses the original equivalent level method developed for assessing the water quality of the Rybinsk Reservoir, and its application to forecasting the negative environmental impacts that are highly likely to occur if the projects to restore the land lost to impoundment are implemented. It is shown that the dependencies of the concentrations of certain inorganic ions and petroleum products in the reservoir on its water level are closely modeled by the decreasing exponential regression. For 12 hydrochemical indicators, the regression coefficients were graphically determined, and their statistical significance was verified by the Fisher's and Student's tests. The resultant relationships were used to calculate the maximum equivalent levels, below which the environmental impacts can be compared with exceeding the maximum allowable concentrations (MAC). It is shown that an important role in the study of the dynamics of the reservoir's hydrochemical parameters belongs to the rate of change in the concentration of chemicals due to changes in the water level. The rates of increase in the concentration of 12 hydrochemical indicators upon crossing the Rybinsk Reservoir's normal retention level (101.81 m BHS) were estimated. The highest rate is demonstrated by Mn^{2+} cations (the only indicator for which the rate exceeds 1 MAC/m). Considering the changes in the Rybinsk Reservoir water quality predicted by using the proposed methodology, there is reason to believe that the implementation of projects for partial drainage of the flooded land by lowering the reservoir's normal retention level to 98 m BHS will cause 9 out of 12 substances to rise above the MACs for fishery reservoirs, while during 2018–2024, only 4 indicators exceeded their MACs. Thus, implementing such projects is unadvisable. We have particularly studied the processes of Mn^{2+} and Fe_{tot} influx into the reservoir, since other authors have reported these elements to have exceeded the permissible levels in other reservoirs, but this was often associated with the region-specific geochemistry. A scenario is considered in which the reservoir's level will be fixed at a constant elevation over a long period of time. The supposition is that the water quality in this case will be consistently affected.

Keywords: Rybinsk Reservoir; water quality; equivalent level; heavy metals; anions; land restoration

For citation: Nartov A. S., Lavrukhina M. A. Assessment of hydrochemical indicators of the Rybinsk Reservoir using the equivalent level method. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 111–124. doi: 10.17076/lim2300

Введение

Рыбинское водохранилище и прилегающие к нему территории находятся на северо-западе Ярославской области, часть акватории водоема расположена в Тверской и Вологодской областях (58°22'30" с. ш. 38°25'04" в. д.). Водохранилище создано на месте Молого-Шекснинской равнины, образовавшейся после высыхания ледникового озера, располагавшегося здесь незадолго до начала эпохи голоцена [Кузин, 1972]. Согласно постановлению ЦК партии и советского правительства «О строительстве гидроузлов в районе Углича и Рыбинска» (1935 г.), проект был призван решить две ключевые задачи: улучшение судоходства на верхнем участке Волги и энергоснабжение региона за счет строительства двух новых ГЭС. Изначально

планировалось затопление 2500 км² суши до отметки 98 м БС [Мальшев, Мальцев, 1967].

К 1937 г. инженерами «Гидростройпроекта» было обосновано и принято решение о затоплении территорий до 102 м БС. Это позволило повысить мощность ГЭС до 330 МВт, т. е. на 65 % относительно первоначального проекта, но увеличивало площадь затопления почти вдвое, а новый проект подразумевал затопление Молого-Шекснинского междуречья, включая г. Мологу [Баранова, 2022]. Заполнение водохранилища началось в апреле 1941 г. Интенсивные работы, проводившиеся с применением передовых для того времени технологий, не прекращавшиеся даже в первые месяцы Великой Отечественной войны, позволили уже в 1941 г. ввести в эксплуатацию отдельные узлы Рыбинского гидроузла. Рыбинское водхр., ставшее крупнейшим

по площади искусственным водоемом в мире, в военные годы играло важнейшую роль как для обеспечения судоходства, так и для выработки столь необходимой электроэнергии, даже с учетом приостановки строительно-монтажных работ из-за тяжелого положения на фронте [Малышев, Мальцев, 1967; Каримов, 2018; Рыбинское..., 2020; Баранова, 2022]. Почти сразу после окончания военных действий работы по заполнению продолжились, к маю 1947 г. был достигнут нормальный подпорный уровень, все узлы гидротехнического комплекса вышли на запланированные проектные мощности [Малышев, Мальцев, 1967; Рыбинское..., 2020].

Рыбинское вдхр. относится к водоемам котловинного типа, сформированным среди аккумулятивных озерно-аллювиальных террас. На сегодняшний день общая длина его береговой линии составляет 2150 км, из них около 12 % приходится на аккумулятивные берега, столько же – на абразионные и около 1 % – на аккумулятивно-абразионные участки. За первые 70 лет существования водоема площадь земель, утраченных из-за абразионных процессов, оценивалась почти в 33,5 км², хотя исследователи отмечают снижение скорости эрозии береговой зоны [Широкова и др., 2013].

Нормальный подпорный уровень (НПУ) Рыбинского вдхр. установлен на отметке 101,81 м БС; форсированный подпорный уровень (ФПУ), до которого технически может быть заполнен водоем, составляет 103,81 м БС. Уровень мертвого объема (УМО) равен 96,91 м БС, а реальный уровень водоема в течение февраля 2026 г. варьировался в пределах 99,67–99,81 м БС (на 27.02.2026 УМО составлял 99,67 м БС) [Рыбинское...; Уровни...].

В Рыбинском вдхр. выделяются зоны: постоянного затопления (площадь до 2385 км²); периодического затопления (площадь до 2165 км², делится на зону ежегодного и зону полноводного, или паводкового затопления) [Васильев и др., 2016]. Общая площадь затопления при достижении НПУ составляет 4550 км², а при заполнении до ФПУ возрастает до 5400 км² [Об утверждении..., 2025]. Зона периодического затопления характеризуется развитой гидрологической сетью, разнообразием типов ландшафта и биотопов [Васильев и др., 2016]. Некоторые из них (например, торфяные острова) являются частью сложных мини-биосистем с достаточно богатым биоразнообразием, в том числе со множеством промысловых видов [Герасимов, 2015]. Более половины затопленных земель относились к лесным массивам, около 40 % – к с/х угодьям (408 колхозов). Правительство страны перенесло с затопленных террито-

рий ряд объектов промышленной и социальной инфраструктуры, переселило из затопленных деревень и домовладений несколько тысяч жителей [Шкардюк, 2013; Законнов и др., 2015].

В настоящее время Рыбинское вдхр. продолжает выполнять ряд важных функций в самых разных секторах народного хозяйства. Среди них: энергетическая функция; функция регулирования водного режима р. Волги; транспортная и навигационная функция (в т. ч. лесосплав); водообеспечение прилегающих населенных пунктов; использование биологических ресурсов водоема (в т. ч. рыбный промысел); рекреационная функция [Николаев, 1956; Матлин и др., 1971; Шкардюк, 2013; Ложкина и др., 2020; Рыбинское..., 2020; Об утверждении..., 2025].

К северо-западному побережью водохранилища примыкает Дарвинский государственный заповедник – основное учреждение, осуществляющее природоохранную деятельность на акватории водоема [Калецкая и др., 1988]. Близлежащие объекты инфраструктуры в основном связаны с вышеперечисленными функциями водохранилища и включают объекты энергетики, гидроузлы, плотины, элементы транспортной инфраструктуры и т. д. [Иванова, 2016].

На тепловой баланс и химический состав водохранилища существенное влияние оказывают донные отложения. Процессы их формирования, накопления и трансформации достаточно сложны и до конца не изучены. Однако исследователями отмечаются выраженные тенденции сокращения илистых и торфяных участков дна с замещением их песчаными наносами. Поскольку торфянистые образования способны сорбировать ряд загрязняющих соединений, их разрушение приводит к высвобождению последних из донных отложений в поверхностные воды, изменяя их химический состав. Кроме этого, отмечаются процессы гидроморфного почвообразования, что привело к сокращению площади акватории водохранилища примерно на 70 км² [Буторин и др., 1982; Законнов и др., 2015].

Начиная с периода перестройки в прессе, а позже даже в научной литературе стали появляться проекты, предусматривающие снижение уровня Рыбинского вдхр. Обоснование данных проектов сводится к возможности восстановления рельефа затопленных территорий, возрождения земель, изъятых из с/х фонда, но основной акцент авторы подобных работ делают на воссоздание исторического облика г. Мологи на основе данных исторических документов с учетом особенностей современного градостроительства [Гржибовская, 2012; Филатова, 2024; Шубенков, 2024].

Анализ мирового опыта по осуществлению подобных проектов затрудняется их малочисленностью. Одним из наиболее показательных примеров принципиальной технической возможности реализовать комплекс мероприятий по демонтажу гидротехнических систем может служить разборка плотин на р. Элва (США). В период с 2011 по 2014 год там был произведен демонтаж двух плотин, в результате чего снизился уровень водоема. Однако необходимо отметить, что демонтажные работы проводились на объекте с иными целями, нежели в проектах, связанных с Рыбинским водохранилищем, а именно – с целями выемки загрязненных донных отложений, восстановления гидрологического режима и улучшения условий обитания водной биоты, включая ценные промысловые виды [Ritchie et al., 2018].

В 2021 г. был снижен уровень оз. Лаго-ди-Резия, искусственного водоема, созданного на севере Италии в 1950 г., заполнение котловины которого привело к последствиям, схожим с последствиями заполнения Рыбинского вдхр. для г. Калязина. Но ключевое отличие гидротехнических мероприятий, проведенных на оз. Лаго-ди-Резия, от проектов по Рыбинскому вдхр. заключается в том, что первые носили временный характер. Проведенные в Италии исследования внесли важный вклад как в историческую науку (изучение сохранности фрагментов архитектурных сооружений), так и в агрохимию. Специалистами была выявлена потенциальная возможность применения донных отложений в сельском хозяйстве, поскольку за период существования озера они обогатились питательными соединениями [Филатова, 2024].

Но в проектах, посвященных восстановлению земель на акватории Рыбинского водохранилища, основное внимание уделяется культурно-историческому аспекту, а оценка экологических последствий их реализации зачастую остается не проработанной должным образом. Между тем необходимо подчеркнуть, что в случае с Рыбинским вдхр. речь идет не о полном его осушении, а сохранении примерно 60 % акватории. При этом авторы проектов, как правило, указывают на необходимость рекультивации земель, осушение которых предполагают их разработки, предлагают различные планы их мелиорации. Но этими исследователями почти не изучается вопрос об изменении качества воды в водоеме как неизбежном следствии снижения уровня его заполнения [Шубенков, 2024].

В данной статье представлена новая авторская методика, позволяющая осуществить прогноз изменения концентрации ряда химических веществ, связанного с колебаниями уровня

заполнения Рыбинского вдхр., или, напротив, при наличии соответствующих данных оценить уровень воды по значению гидрохимических показателей.

Методика основана на закономерностях, выявленных при анализе данных о качестве воды Рыбинского вдхр. по 12 показателям за период 2009–2024 гг., и использована для прогноза возможных экологических последствий реализации одного из планов по восстановлению земель, затопленных при создании этого водоема. Также применение методики дало возможность для каждого показателя поставить в соответствие величинам рыбохозяйственных ПДК_{рх} предельные уровни водохранилища, ниже которых с высокой вероятностью следует ожидать негативных экологических последствий, сопоставимых с превышением установленных нормативов, и осуществить прогноз изменения качества воды при понижении НПУ до отметки 98 м БС.

Материалы и методы

Данные о качестве воды Рыбинского вдхр. за 2009–2017 гг. взяты из исследования [Лагутина и др., 2019], в котором также приведены значения удельного комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ), рассчитанного за указанный период для трех точек, расположенных в северной части водоема. Поскольку величины ПДК_{рх} являются установленными нормами и, очевидно, остаются неизменными и не зависящими от уровня водоема, то при увеличении концентрации с химических соединений в воде будут возрастать и отношения $c/\text{ПДК}_{рх}$. В работе [Лагутина и др., 2019] проанализировано, как будут повышаться отношения $c/\text{ПДК}_{рх}$ для ряда неорганических анионов, катионов NH_4^+ , щелочноземельных металлов, тяжелых металлов и нефтепродуктов (НП) в воде Рыбинского вдхр. при его заполнении до 13 разных уровней в диапазоне 90–102 м БС с шагом 1 м. Эти сведения использованы нами для определения графическим способом коэффициентов регрессии в уравнениях, описывающих зависимости 12 гидрохимических показателей от уровня заполнения водоема.

Для дальнейших расчетов использованы данные о качестве воды Рыбинского вдхр., полученные в 2018–2024 гг. в Центральной лаборатории водопровода ГП Ярославской области «Северный водоканал», в том числе при участии одного из авторов статьи в 2023–2024 гг. Методики и приборная база, использованные для измерения рассматриваемых в статье показателей, приведены в табл. 1. Средние значения результатов 30 измерений для каж-

дого года представлены в табл. 2. Систематическая составляющая неопределенности рассчитана на основе данных об относительных погрешностях, указанных в соответствующих методиках измерения [ПНД Ф 14.1:2:4.128-98; ГОСТ 31867-2012; ГОСТ 31869-2012; ГОСТ Р 57162-2016]. За случайную составляющую неопределенности принято среднее квадратическое отклонение (СКО) для серии из 30 измерений. Приведенные значения расширенных неопределенностей рассчитаны в соответствии с [ГОСТ 34100.3-2017] для доверительного интервала 95 % (коэффициент охвата $k_p = 1,96$).

Результаты и обсуждение

Расчеты, произведенные нами на основании данных [Лагутина и др., 2019], показывают, что

зависимость отношения концентрации загрязняющих веществ в водоеме к ПДК_{рх} от уровня водохранилища близка к обратной экспоненциальной (рис.) и может быть выражена соотношением общего вида (1):

$$c = a \cdot e^{-b \cdot h}, \quad (1)$$

где c – кратность превышения ПДК_{рх}; h – уровень водоема, м БС; a – безразмерный коэффициент регрессии; b – коэффициент регрессии, м⁻¹.

Убывающий характер регрессии согласуется с данными авторов предшествующих работ, которые отмечают снижение концентрации многих веществ в Рыбинском вдхр. в многоводные годы [Кашутина и др., 2024] и, напротив, ухудшение качества воды в Аргазинском вдхр. при понижении уровня, обусловленное меньшей кратностью разбавления [Орлова и др., 2025].

Таблица 1. Приборно-методическая база, использованная при оценке качества воды Рыбинского водохранилища

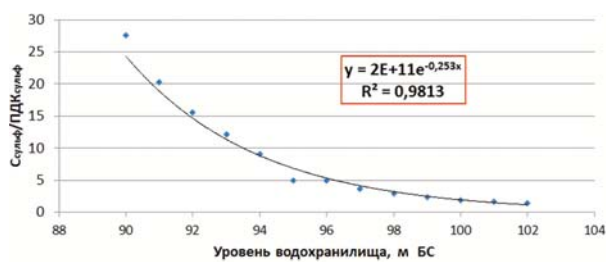
Table 1. Instrumental and methodological base used in assessing the water quality of the Rybinsk Reservoir

Показатель Index	Методика Methodology	Средства измерения Measuring instruments
Анионы (SO ₄ ²⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻) Anions (SO ₄ ²⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻)	ГОСТ 31867-2012, п.4 GOST 31867-2012, p.4	Ионный хроматограф «Dionex ics-5000» с кондуктометрическим детектором Dionex ICS-5000 Ion Chromatography System with conductometric detector
Катионы (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺) Cations (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺)	ГОСТ 31869-2012, п.5, п.6 GOST 31869-2012, p.5, p.6	Система капиллярного электрофореза «Капель-205» Capel-205 Capillary Electrophoresis System
Тяжелые металлы (Fe _{общ} , Mn ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ²⁺) Heavy metals (Fe _{tot} , Mn ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ²⁺)	ГОСТ Р 57162-2016 GOST R 57162-2016	Атомно-абсорбционный спектрометр с электро-термической ионизацией «Люмэкс МГА-1000» Lumex MGA-1000 Atomic Absorption Spectrometer with electrothermal ionization
Нефтепродукты (НП) Petroleum products	ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 PND F 14.1:2:4.128-98	Анализатор жидкости «Флюорат-02» Fluorat-02 Liquid Analyzer

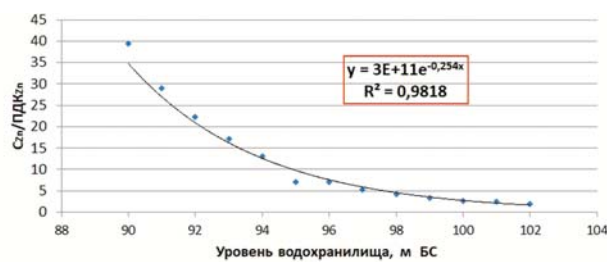
Таблица 2. Гидрохимические показатели Рыбинского водохранилища в 2018–2024 гг., мг/дм³, с указанием расширенной неопределенности [Отчет..., 2024]

Table 2. Hydrochemical indices of the Rybinsk Reservoir in 2018–2024, mg/dm³, with an indication of the expanded uncertainty [Report..., 2024]

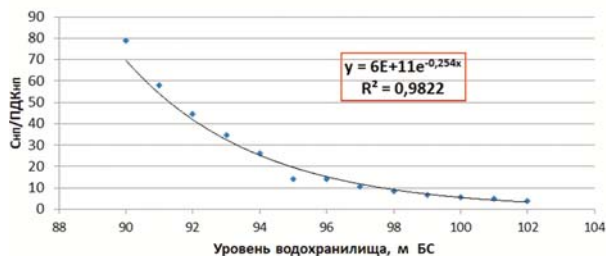
Показатель Index	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
SO ₄ ²⁻	26,0 ± 7,4	23,0 ± 6,6	21,0 ± 6,1	22,0 ± 6,1	23,0 ± 6,1	23,0 ± 6,2	23,0 ± 6,6
NH ₄ ⁺	0,75 ± 0,31	0,78 ± 0,32	0,69 ± 0,29	0,66 ± 0,28	0,58 ± 0,24	0,66 ± 0,27	0,48 ± 0,20
NO ₂ ⁻	0,320 ± 0,065	0,270 ± 0,053	0,045 ± 0,009	0,057 ± 0,012	0,260 ± 0,054	0,203 ± 0,040	0,042 ± 0,008
NO ₃ ⁻	3,16 ± 0,57	2,33 ± 0,45	2,68 ± 0,53	2,58 ± 0,52	3,22 ± 0,65	3,60 ± 0,72	2,70 ± 0,55
Fe _{общ} Fe _{tot}	0,63 ± 0,23	0,39 ± 0,14	0,61 ± 0,23	0,50 ± 0,18	0,40 ± 0,14	0,42 ± 0,15	0,42 ± 0,15
Mn ²⁺	0,078 ± 0,031	0,061 ± 0,024	0,063 ± 0,024	0,064 ± 0,025	0,060 ± 0,023	0,067 ± 0,026	0,070 ± 0,026
Cu ²⁺	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Zn ²⁺	0,048 ± 0,020	0,031 ± 0,013	0,028 ± 0,012	0,024 ± 0,010	0,023 ± 0,009	0,022 ± 0,009	0,015 ± 0,006
НП Petroleum prod.	0,0069 ± 0,0032	0,0054 ± 0,0026	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Ca ²⁺	33,0 ± 7,9	33,5 ± 7,7	27,2 ± 6,5	28,0 ± 6,7	29,0 ± 6,5	29,0 ± 6,6	34,0 ± 7,9
Mg ²⁺	9,7 ± 2,3	10,9 ± 2,5	10,0 ± 2,2	9,6 ± 2,2	9,1 ± 2,1	9,3 ± 2,1	9,7 ± 2,2



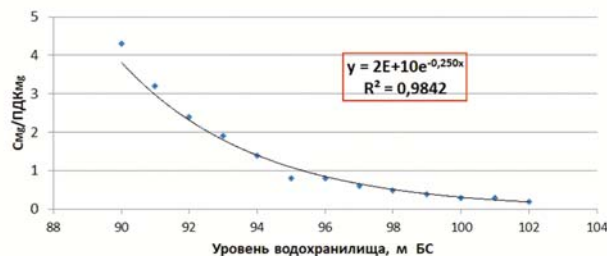
I



II



III



IV

Зависимость кратности превышения ПДК_{рх} в Рыбинском водохранилище от уровня водоема: I – SO₄²⁻; II – Zn²⁺; III – НП; IV – Mg²⁺ (по данным: [Лагутина и др., 2019])

The dependence of rate of excess of fishery maximum permissible concentration in the Rybinsk Reservoir on the water level of the reservoir: I – SO₄²⁻; II – Zn²⁺; III – petroleum products; IV – Mg²⁺ (according to data [Lagutina et al., 2019])

В табл. 3 приведены коэффициенты регрессии a и b в формуле (1), определенные графически для 12 гидрохимических показателей. Для каждого уравнения регрессии рассчитаны коэффициенты детерминации R^2 . С целью оценки надежности полученных уравнений вычислены критерии Фишера F , а для оценки значимости коэффициентов регрессии – критерии Стьюдента t_a и t_b при доверительном интервале 99 %. Расчеты производились с использованием онлайн-сервиса [Уравнение...] после предварительной линеаризации уравнения (1) путем логарифмирования обеих его частей. Результаты также представлены в табл. 3.

Уравнение парной регрессии, построенное по 13 точкам, при выбранном доверительном интервале 99 % считается статистически значимым, если критерий Фишера $F > 9,86$ (степени свободы $k_1 = 1, k_2 = 11$), а параметры модели (коэффициенты регрессии) значимы, если критерий Стьюдента $t > 3,11$ (число степеней свободы $k = 11$) [Левитес, 2024]. Как видно из табл. 3, для каждого из показателей выполняются данные условия, поэтому предлагаемые уравнения регрессии можно считать статистически надежными.

Уравнение (1) после определения коэффициентов регрессии для различных веществ может быть использовано с целью оценки динамики концентрации загрязнителей, связанной с понижением уровня Рыбинского вдхр.

Производная функции (1) позволяет оценить скорость роста концентрации химических веществ в водоеме при снижении уровня последнего:

$$c' = -a \cdot b \cdot e^{-b \cdot h}, \quad (2)$$

где c' – приращение концентрации загрязняющего вещества в водоеме при единичном понижении его уровня, м⁻¹; h – уровень водоема, м БС; a – безразмерный коэффициент регрессии; b – коэффициент регрессии, м⁻¹.

Из формулы (1) следует, что уровень Рыбинского вдхр. может быть оценен по значениям отношения концентрации загрязняющих веществ к ПДК_{рх} в водоеме по уравнению (3):

$$h = -\frac{1}{b} \cdot \ln \frac{c}{a}, \quad (3)$$

где c – кратность превышения ПДК_{рх}; h – уровень водоема, м БС; a – безразмерный коэффициент регрессии; b – коэффициент регрессии, м⁻¹.

На основании вышесказанного нами предлагается ввести термин *эквивалентный уровень по веществу*. Данная величина, рассчитанная по формуле (3) с использованием результатов гидрохимического анализа, позволит оценить, понижению/повышению до какой отметки водоема соответствует наблюдаемое значение того или иного показателя, т. е. с каким изменением уровня можно сравнить экологические последствия наблюдаемой гидрохимической картины.

Таблица 3. Параметры уравнений парной регрессии для гидрохимических показателей Рыбинского водохранилища

Table 3. Parameters of paired regression equations for hydrochemical indices of the Rybinsk Reservoir

Показатель Index	Коэффициенты регрессии Regression coefficients		Коэффициент детерминации Coefficient of determination R^2	Критерий Фишера Fisher's criterion F	Критерий Стьюдента Student's t-test	
	a	b			t_a	t_b
SO ₄ ²⁻	2·10 ¹¹	0,253	0,9813	577,08	25,65	24,02
PO ₄ ³⁻	1·10 ¹¹	0,253	0,9825	615,79	26,02	24,82
NH ₄ ⁺	2·10 ¹¹	0,253	0,9820	599,27	26,08	24,48
NO ₂ ⁻	7·10 ¹¹	0,254	0,9821	604,69	27,54	24,59
NO ₃ ⁻	1·10 ⁸	0,207	0,8871	86,43	8,57	9,30
Fe _{общ} Fe _{tot}	6·10 ¹¹	0,254	0,9820	599,23	27,31	24,48
Mn ²⁺	9·10 ¹¹	0,254	0,9821	605,09	27,73	24,60
Cu ²⁺	3·10 ¹¹	0,254	0,9824	612,24	26,83	24,74
Zn ²⁺	3·10 ¹¹	0,254	0,9818	593,91	26,38	24,37
НП Petroleum prod.	6·10 ¹¹	0,254	0,9822	605,44	27,33	24,61
Ca ²⁺	3·10 ¹⁰	0,255	0,9732	399,69	19,65	19,99
Mg ²⁺	2·10 ¹⁰	0,250	0,9842	684,12	25,96	26,16

Кроме того, если в зависимости (3) концентрацию загрязняющего вещества в водоеме принять равной ПДК_{рх} ($c = 1$), результат расчетов будет соответствовать предельному эквивалентному уровню. Он показывает пороговую величину, ниже которой экологический риск от уменьшения водной массы становится эквивалентен ущербу от превышения ПДК_{рх} по конкретному веществу.

В табл. 4 представлены предельные эквивалентные уровни Рыбинского водохр., рассчитанные

нами по формуле (3) с использованием ранее вычисленных коэффициентов регрессии, результаты расчета модуля скорости изменения каждого из 12 показателей для отметки НПУ, вычисленные по формуле (2), и кратность превышения ПДК_{рх}, спрогнозированные с применением зависимости (1) для наиболее распространенного из предполагаемых сценариев восстановления около 40 % затопленных земель, при котором планируется снижение уровня водохранилища до отметки 98 м БС [Филатова, 2024].

Таблица 4. Предельные эквивалентные уровни Рыбинского водохранилища для 12 гидрохимических показателей, скорости изменения этих показателей при изменении уровня и кратность их превышения при снижении НПУ до 98 м БС

Table 4. Maximum equivalent levels of the Rybinsk Reservoir for 12 hydrochemical indices, the rates of these indices change with a change in the level and the rate of their excess with a decrease in the normal backwater level to 98 m BS

Показатель Index	ПДК _{рх} , мг/дм ³ [Об утверждении..., 2025] MAC, mg/dm ³ [On approval..., 2025]	Предельный эквивалентный уровень, м БС Maximum equivalent level, m BS	Модуль скорости изменения показателя для НПУ, м ⁻¹ The rate of change of the index module for the normal backwater level, m ⁻¹	Кратность превышения ПДК _{рх} при снижении НПУ до 98 м БС Rate of excess of MAC with a decrease in the NBL to 98 m BS
SO ₄ ²⁻	100	102,9	0,314	3,41
PO ₄ ³⁻	0,15	100,1	0,157	1,71
NH ₄ ⁺	0,5	102,9	0,314	3,41
NO ₂ ⁻	0,08	107,4	0,996	10,83
NO ₃ ⁻	40	89,0	0,014	0,15
Fe _{общ} Fe _{tot}	0,1	106,8	0,854	9,28
Mn ²⁺	0,01	108,4	1,280	13,92
Cu ²⁺	0,001	104,0	0,427	4,64
Zn ²⁺	0,01	104,0	0,427	4,64
НП Petroleum prod.	0,05	106,8	0,854	9,28
Ca ²⁺	180	94,6	0,039	0,42
Mg ²⁺	40	94,9	0,042	0,46

Как видно из табл. 4, минимальный предельный эквивалентный уровень соответствует ионам NO_3^- , хотя максимальные значения ПДК_{рх} из всех проанализированных показателей установлены для Ca^{2+} . Это связано с тем, что важную роль играет скорость изменения гидрохимических показателей при понижении уровня. Для Ca^{2+} она почти втрое выше скорости изменения концентрации ионов NO_3^- .

Наибольшие значения имеют предельные эквивалентные уровни для тяжелых металлов: Mn^{2+} , Cu^{2+} и Zn^{2+} . Это объясняется как наименьшими значениями ПДК_{рх} для этих показателей по сравнению с остальными, исследованными в данной работе (минимальное из 12 значений установлено для Cu^{2+}), так и, в случае Mn^{2+} , высокой скоростью изменения концентрации при снижении уровня водоема.

Максимальная скорость роста концентрации при прохождении отметки НПУ Рыбинского водохранилища отмечается для Mn^{2+} – единственного из 12 показателей, изменение которого на отметке НПУ превышает величину ПДК_{рх} (в расчете на изменение уровня на 1 м). Вероятно, это связано с высокой удерживающей способностью водоема по данному элементу, которая была отмечена для Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ исследователями Можайского вдхр. [Даценко, Пуклаков, 2024]. Наши расчеты показывают, что скорость приращения показателя $\text{Fe}_{\text{общ}}$ также принимает достаточно высокое значение (0,854 ПДК_{рх}) при прохождении точки НПУ, что согласуется с утверждением авторов работ [Веницианов, Кирпичникова, 2020; Даценко, Пуклаков, 2024]

о сходстве механизмов трансформации указанных элементов в водохранилищах.

С целью дополнительной проверки выявленных зависимостей по формуле (3) произведены оценочные расчеты эквивалентных уровней Рыбинского вдхр. в 2018–2024 гг. по 11 показателям (расчет по иону PO_4^{3-} не производился из-за отсутствия экспериментальных данных), которые затем сравнивались с реальными значениями уровня за указанный период, с последующим расчетом относительной погрешности по формуле (4):

$$\delta = \frac{|h-h_э|}{h} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где δ – относительная погрешность при расчете эквивалентного уровня, %; h – реальный уровень вдхр., м БС; $h_э$ – эквивалентный уровень вдхр., м БС.

Результаты расчетов и усредненная оценка погрешности за 2018–2024 гг. приведены в табл. 5. Курсивом в таблице выделены уровни ниже эквивалентного, что соответствует превышению значения ПДК_{рх} по данному показателю.

Расчеты, выполненные для дополнительной проверки выявленных зависимостей, по 9 из 11 показателей дают результаты оценки уровня водоема с относительной погрешностью, не превышающей 5 %. Максимальная погрешность наблюдается при расчете по НП. Скорее всего, это связано с большим значением относительной расширенной неопределенности измерения для низких концентраций (50 %, согласно использованной методике [ПНД Ф 14.1:2:4.128-98]). Кроме того, одной

Таблица 5. Сравнение оценочных эквивалентных уровней Рыбинского водохранилища с реальными, м БС
Table 5. Comparison of the estimated equivalent levels of the Rybinsk Reservoir with the actual ones, m BS

Показатель Index	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	δ , %
SO_4^{2-}	108,2	108,7	109,0	108,8	108,7	108,7	108,7	7,954
NH_4^+	101,2	101,1	101,6	101,8	102,3	101,8	103,0	1,148
NO_2^-	101,9	102,6	109,6	108,7	102,7	103,8	109,9	4,919
NO_3^-	101,3	102,7	102,0	102,2	101,2	100,6	102,0	1,052
$\text{Fe}_{\text{общ}}$ Fe_{tot}	99,5	101,4	99,7	100,4	101,3	101,1	101,1	0,868
Mn^{2+}	100,3	101,2	101,1	101,1	101,3	100,9	100,7	0,453
Cu^{2+}	<101,3	<101,3	<101,3	<101,3	<101,3	<101,3	<101,3	0,648
Zn^{2+}	97,9	99,6	100,0	100,6	100,8	100,9	102,4	1,157
НП Petroleum prod.	114,6	115,5	<115,8	<115,8	<115,8	<115,8	<115,8	14,853
Ca^{2+}	101,3	101,2	102,0	101,9	101,8	101,8	101,1	0,910
Mg^{2+}	100,5	100,1	100,4	100,6	100,8	100,7	100,5	0,350
Реальный уровень, м БС Actual level, m BS	100,75	100,64	101,26	100,69	100,57	100,62	100,11	

Примечание. δ – относительная погрешность, рассчитанная по формуле (4).

Note. δ – relative error calculated using formula (4).

из вероятных причин могут быть особенности физико-химических свойств нефтепродуктов. По своей природе они принципиально отличаются от других веществ, исследованных в этой работе. Показатель НП включает в себя обширную категорию органических веществ, которые крайне неравномерно распределяются в толще воды, а в силу своих физико-химических свойств (низкая плотность, липофильность) концентрируются преимущественно на поверхности водоема. Это может приводить к значительным колебаниям данного показателя в течение года, что также отмечали авторы статьи [Кашутина и др., 2024].

На протяжении периода исследования (2018–2024 гг.) абсолютный уровень Рыбинского вдхр. оставался на отметке ниже НПУ. Эквивалентные уровни водоема в эти годы были ниже рассчитанных предельных значений по ряду приоритетных гидрохимических показателей: НП, анионы NO_2^- , катионы тяжелых металлов, NH_4^+ . Превышения по анионам SO_4^{2-} и NO_3^- , а также по катионам Ca^{2+} и Mg^{2+} на протяжении всех семи лет не наблюдалось.

Постоянное превышение по содержанию Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в течение всего периода исследования (табл. 2, 5) хорошо согласуется с данными, представленными в публикациях последних лет, связанных с изучением гидрохимического состава воды и донных отложений Рыбинского и других водохранилищ России и Казахстана [Григорьева, Кузовлев, 2021; Mamytova et al., 2022; Кравцова и др., 2023].

Но аналогичные результаты, описанные в предыдущих работах, интерпретируются их авторами по-разному. Некоторые исследователи объясняют высокие концентрации Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в гидрологической системе Рыбинского водохранилища и р. Мологи преимущественно естественными процессами, хотя указывают на некоторый вклад промышленных объектов в формирование химического состава отдельных притоков (напр., устье р. Кошта) [Фоменко, 2020; Кашутина и др., 2024]. В статье [Александрова и др., 2020] главным источником этих элементов в Нижнекамском вдхр. названы донные отложения и почвы бассейна водоема, где металлы образуют комплексы с органическими соединениями. К подобным выводам касательно Нижнекамского вдхр. приходят авторы исследования [Фашевская и др., 2023], связывая поступление Mn^{2+} и других металлов с их вымыванием из почвы и грунта и лишь незначительную долю отводя вкладу сточных вод (0,1–0,2 %). К основным причинам превышения Mn^{2+} в Цимлянском вдхр. отнесены особенности фракционного состава грунтов [Степаньян и др.,

2024], а наиболее интенсивное поступление Mn^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cu^{2+} и Zn^{2+} в Аргазинское вдхр. связывают с ливневыми осадками [Орлова и др., 2025]. В статье [Каменев и др., 2025] отмечаются заметные изменения концентрации Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ на протяжении года в Воронежском вдхр., с максимумами в весенне-летний период. Авторы объясняют это тем, что создание гидротехнических сооружений привело к изменению количеств и скоростей перемещения этих элементов. С другой стороны, основываясь на фиксируемых независимо от года, сезона и створа высоких концентрациях Mn^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и других металлов в Южноуральском вдхр., авторы статьи [Нохрин и др., 2021] приходят к выводу о смешанном природно-антропогенном характере их поступления в водоем.

Таким образом, чтобы достоверно установить причины наблюдаемого превышения относительно установленных на федеральном уровне ПДК_{рх}, требуется более детальное изучение геохимических процессов, протекающих в природно-антропогенном комплексе, включающем не только воду, но и донные отложения водохранилища, местные геологические структуры, объекты хозяйственной деятельности и т. д.

Как показано в работах [Липатникова и др., 2020; Толкачев и др., 2023], ряд более токсичных тяжелых металлов, включая Cd, Pb и Cr, способны образовывать прочные комплексы с гидроксидами Fe и Mn на границе между донными отложениями и нижними слоями воды. Концентрация и химическая форма этих элементов влияет на процессы миграции других загрязнителей, в некоторых случаях способствуя улучшению качества поверхностных вод. Поэтому не следует исключать эти вещества из числа показателей, определяемых при оценке качества природных вод, но говорить о наличии загрязнения воды Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ можно только с учетом особенностей региональной геохимии.

Поскольку загрязнение Рыбинского вдхр. обусловлено рядом природных и антропогенных факторов, которые находятся в сложной взаимосвязи, они должны учитываться в случае положительного решения о реализации проектов по восстановлению затопленных земель. Снижение уровня даже на 4 м относительно НПУ приведет к заметному ухудшению экологической ситуации. Если в 2024 г. наблюдалось превышение ПДК_{рх} только по 4 из 12 показателей: $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Mn^{2+} , Cu^{2+} и Zn^{2+} (табл. 5), то при опускании отметки НПУ до 98 м следует ожидать превышения уже по 9 из 12 показателей (табл. 3). В норме останется содержание NO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} .

Достоверную оценку изменений качества воды при стабилизации уровня водохранилища на одной отметке на основе экспериментальных данных осуществить довольно затруднительно, поскольку водоем проточный и его уровень зависит от множества факторов, включая количество осадков в течение определенного периода времени, испытывает сезонные колебания и т. д. (за последний год уровень Рыбинского вдхр. менялся в пределах 99,67–101,78 м) [Уровни...]. Можно предположить, что природные процессы, благодаря которым формируется ионный состав воды, придут в состояние динамического равновесия через некоторое время после стабилизации уровня водоема. Например, повышение концентрации химических веществ в водоеме, обусловленное понижением НПУ, приведет к сокращению разницы между содержанием этих соединений в поверхностных водах и в донных отложениях, из-за чего скорость ионного обмена между этими средами уменьшится до некоего равновесного значения, отклонения от которого будут происходить в небольшом диапазоне. Интенсивность антропогенных процессов, влияющих на качество воды, вероятнее всего, не изменится и скорость поступления загрязняющих веществ от антропогенных источников останется прежней. Но за счет меньшей кратности разбавления будут постоянно регистрироваться более высокие значения гидрохимических показателей, чем прежде. Поэтому при долгосрочной стабилизации уровня Рыбинского вдхр., вероятно, следует ожидать ухудшения показателей качества воды до определенных постоянных величин, несущественно изменяющихся в узких пределах.

Ликвидация последствий снижения НПУ потребует немалых финансовых затрат, связанных как с необходимостью устранения загрязнения воды и грунта осушенных территорий, так и с иными последствиями осушения, включая разрушение биогеоценологических связей, установившихся в водоеме и на прибрежных землях за десятки лет существования водоема. Помимо этого, следует ожидать значительного экономического ущерба из-за нарушения функционирования сложной и многоплановой инфраструктуры, деятельность которой неразрывно связана с Рыбинским вдхр. (нарушение водоснабжения, навигации, энергетической функции и др.) [Шкардюк, 2013]. Поэтому реализация подобных проектов нам представляется преждевременной и нецелесообразной как с экологической, так и с экономической точки зрения.

Заключение

Снижение уровня Рыбинского вдхр. приведет к росту концентрации в нем загрязняющих веществ по закону, близкому к обратной экспоненциальной зависимости. При этом важным показателем представляется не только абсолютное изменение концентрации, но и скорость этого изменения, которая может быть оценена через предлагаемую нами величину эквивалентного уровня водоема по определенному веществу. Данный показатель также дает возможность оценить предельные уровни, ниже которых экологические последствия будут эквивалентны превышению ПДК_{рх} по данному показателю. Прогнозирование качества воды с применением метода эквивалентного уровня позволяет предположить, что в случае понижения отметки водоема на 4 м (до 98 м БС), как предлагается в ряде проектов по восстановлению затопленных земель, следует ожидать увеличения концентраций анионов SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , катиона NH_4^+ и НП в Рыбинском вдхр. до значений, превышающих нормативы ПДК_{рх} в 1,7–10,8 раза, тогда как в 2024 г. зафиксировано превышение только по содержанию ряда металлов.

При этом наблюдаемые высокие концентрации Mn^{2+} и $Fe_{общ}$ могут быть обусловлены особенностями региональной геохимии, которые необходимо учитывать при оценке качества воды.

Реализация проектов по восстановлению земель, утраченных при создании Рыбинского вдхр., с высокой вероятностью приведет к серьезным экологическим проблемам, а также к нарушению инфраструктуры, связанной с водохранилищем, и как следствие – к значительному урону в нескольких секторах отечественной экономики. Таким образом, подобные проекты представляются нерациональными, сопряженными с неоправданно большими финансовыми затратами и с ущербом для окружающей среды.

Литература

- Александрова А. Б., Иванов Д. В., Маланин В. В., Шурмина Н. В., Галиахметова Л. К., Богданова О. А. Показатели накопления и миграции тяжелых металлов в бассейне равнинного водохранилища // Геология, география и глобальная энергия. 2020. № 4(79). С. 126–133.
- Баранова А. С. Молога. Создание Рыбинского водохранилища // Переломные моменты истории: люди, события, исследования: Мат-лы междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 01 апр. 2022 г.). СПб., 2022. С. 138–142.

Буторин Н. В., Курдина Т. Н., Бакастов С. С. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища / Ред. Б. Б. Богословский. Л.: Наука, 1982. 221 с.

Васильев Ю. С., Масликов В. И., Шилин М. Б. Режим регулирования стока Рыбинского водохранилища как основной фактор формирования экологической ситуации в осушенной зоне // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 45. С. 28–42.

Веницианов Е. В., Кирпичникова Н. В. Оценка состояния качества воды системы водохранилищ – источников питьевого водоснабжения Москвы – по многолетней динамике гидрохимических параметров // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. С. 67–76.

Герасимов Ю. В. Популяционная динамика рыб Рыбинского водохранилища за период его существования: роль естественных и антропогенных факторов // Труды ВНИРО. 2015. Т. 156. С. 67–90.

ГОСТ 31869-2012. Вода. Методы определения содержания катионов (аммония, бария, калия, кальция, лития, магния, натрия, стронция) с использованием капиллярного электрофореза.

ГОСТ Р 57162-2016. Вода. Определение содержания элементов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией.

ГОСТ 31867-2012. Вода питьевая. Определение содержания анионов методом хроматографии и капиллярного электрофореза.

ГОСТ 34100.3-2017 / ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

Гржибовская О. В. Бумажная реинкарнация Монолога // Рыбинские известия [Электронный ресурс]. 2012. URL: <https://gazeta-rybinsk.ru/2012/04/18/4346> (дата обращения: 17.01.2026).

Григорьева И. Л., Кузовлев В. В. Особенности зимнего гидрохимического режима Иваньковского водохранилища в многолетнем аспекте // Вестник Тверского государственного университета. Сер. География и геоэкология. 2021. № 1(33). С. 14–24. doi: 10.26456/2226-7719-2021-1-14-24

Даденко Ю. С., Пуклаков В. В. Многолетние изменения балансов химических веществ в Можайском водохранилище // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 310–317. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317

Законнов В. В., Литвинов А. С., Законнова А. В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 2. Результаты мониторинга донных отложений и последствия понижения уровня Рыбинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 21–35.

Иванова Н. Во имя Победы // Вестник РусГидро [Электронный ресурс]. 2016. № 7. URL: <https://vestnik-rushydro.ru/articles/7-noyabr-2016/data/vo-imya-pobedy/> (дата обращения: 15.01.2026).

Калецкая М. Л., Немцова С. Ф., Скокова Н. Н. Дарвинский заповедник // Заповедники СССР. Заповедники европейской части РСФСР. I. М.: Мысль, 1988. С. 152–184.

Каменев В. И., Степкин Ю. И., Мелихова Е. П. Особенности формирования качества питьевой воды в г. Воронеже // Российский вестник гигиены. 2025. № 3. С. 23–28. doi: 10.24075/rbh.2025.137

Каримов А. Строительство Рыбинского водохранилища – великий подвиг советского народа // КПРФ. Ярославское областное отделение [Электронный ресурс]. 03.02.2018. URL: <https://yarkprf.ru/строительство-рыбинского-водохранилища/> (дата обращения: 18.01.2026).

Кашутина Е. А., Ясинский С. В., Расулова А. М., Фасахов М. А., Шайдулина А. А., Гришанцева Е. С. Массовое содержание загрязняющих веществ в воде верхневолжских водохранилищ в годы разной водности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 6. С. 38–60. doi: 10.35567/19994508-2024-6-38-60

Кравцова А. В., Ходоровская Н. И., Дерябина Л. В. Комплексная характеристика состояния Шершневского водохранилища (Россия, г. Челябинск) // Научное обозрение. Биологические науки. 2023. № 1. С. 85–90. doi: 10.17513/srbs.1319

Кузин Б. С. Рыбинское водохранилище и его жизнь / Ред. Б. К. Штегман. Л.: Наука, 1972. 364 с.

Лагутина Н. В., Новиков А. В., Сумарукова О. В., Науменко Н. О. Оценка качества вод Рыбинского водохранилища вследствие снижения уровня вод // Природообустройство. 2019. № 2. С. 122–125. doi: 10.34677/1997-6011/2019-2-122-126

Левитес В. В. Теория вероятностей и математическая статистика. Часть 2: Математическая статистика. Мурманск: МАУ, 2024. 108 с.

Липатникова О. А., Лубкова Т. Н., Коробова Н. А. Формы нахождения микроэлементов в воде и донных отложениях Пироговского водохранилища // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 6. С. 59–68. doi: 10.33623/0579-9406-2020-6-59-68

Ложкина Р. А., Томилина И. И., Гапеева М. В. Долговременные изменения качества воды Рыбинского водохранилища по данным биотестирования // Трансформация экосистем. 2020. Т. 3, № 3(9). С. 125–138. doi: 10.23859/estr-200323

Мальшев Н. А., Мальцев М. М. 25 лет Угличской и Рыбинской ГЭС: Из опыта строительства и эксплуатации. М.; Л.: Энергия, 1967. 311 с.

Матлин Г. М., Гохштейн А. Б., Кунахович Г. Д. Единая глубоководная система внутренних водных путей Европейской части СССР. М.: Транспорт, 1971. 129 с.

Николаев В. А. Опыт сплава леса по Рыбинскому водохранилищу. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1956. 51 с.

Нохрин Д. Ю., Дерхо М. А., Мухамедьярова Л. Г., Живетина А. В. Структура изменчивости гидрохимического состава воды в водохранилище озерного типа // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Т. 7, № 2. С. 117–133. doi: 10.37279/2413-1725-2021-7-2-117-133

Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных

объектов рыбохозяйственного значения. Приказ от 26 мая 2025 года № 296 / Министерство сельского хозяйства РФ; Федеральное агентство по рыболовству. Зарегистрирован в Минюсте России 2 июня 2025 г. N 82497.

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

Отчет ГП ЯО «Северный водоканал» / Центральная лаборатория водопровода. Рыбинск, 2024. 58 с.

ПНД Ф 14.1:2:4.128-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02».

Рыбинское водохранилище // Федеральное агентство водных ресурсов Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://voda.gov.ru/reservoirs/7273/> (дата обращения: 10.01.2026).

Рыбинское водохранилище в годы Великой Отечественной войны // Пресс-служба Минприроды России [Электронный ресурс]. 2020. URL: https://www.mnr.gov.ru/press/75-let-pobedy/rybinskoe_vodokhranilishche_v_gody_velikoy_otechestvennoy_voyny/ (дата обращения: 21.01.2026).

Степаньян О. В., Рыбалкина Е. И., Хорошев О. А., Казеев К. Ш., Нестерук Г. В., Клещенко А. В., Польшин В. В., Герасюк В. С. Использование донных отложений Цимлянского водохранилища в качестве органического удобрения // Наука Юга России. 2024. Т. 20, № 4. С. 61–69. doi: 10.7868/S25000640240409

Толкачев Г. Ю., Корженевский Б. И., Коломийцев Н. В. Распределение тяжелых металлов по формам существования и их содержание в донных отложениях плесов Иваньковского водохранилища // Природообустройство. 2023. № 1. С. 89–94. doi: 10.26897/1997-6011-2023-1-89-94

Уравнение регрессии // Новый семестр [Электронный ресурс]. URL: <https://math.semestr.ru/corel/corel.php> (дата обращения: 21.02.2026).

Уровни водохранилищ ГЭС // ПАО «РусГидро» [Электронный ресурс]. URL: <https://rushydro.ru/informer/> (дата обращения: 20.02.2026).

Фашчевская Т. Б., Мотовилов Ю. Г., Кортунова К. В. Моделирование генетических составляющих водного и химического стока тяжелых металлов в бассейне Нижнекамского водохранилища // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 4. С. 492–508. doi: 10.31857/S0321059623040077

Филатова Е. А. Затопленные территории: оценка возможности восстановления утраченного наследия // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2024. № 2(61). С. 28–33. doi: 10.25628/UNIIP.2024.61.2.004

Фоменко А. И. Зональные особенности химического состава вод малых рек бассейна Рыбинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 19–30. doi: 10.35567/1999-4508-2020-1-2

Широкова В. А., Снытко В. А., Низовцев В. А., Фролова Н. Л., Дмитрук Н. Г., Чеснов В. М., Озерова Н. А., Широков Р. С. Тихвинская водная система: ретроспектива и современность. Гидролого-экологическая обстановка и ландшафтные изменения в районе водного пути. М.: Акколитъ, 2013. 376 с.

Шкардюк И. Э. О понижении уровня Рыбинского водохранилища // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 3-2(122). С. 91–94.

Шубенков М. В. Восстановление затопленных природных и культурно-исторических территорий Верхней Волги // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 1. С. 25–36. doi: 10.21869/2311-1518-2024-45-1-25-36

Mamytova N. S., Akbayeva L. Kh., Kobetayeva N. K., Tulegenov Y. A., Makazhanov Y. J. Study of the self-cleaning ability of a reservoir and watercourses by hydrochemical indicators of Akmola region for 2018 // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Сер. Биологические науки. 2022. № 2(139). С. 86–96. doi: 10.32523/2616-7034-2022-139-2-86-96

Ritchie A. C., Warrick J. A., East A. E., Magirl C. S., Stevens A. W., Bountry J. A., Randle T. J., Curran C. A., Hilldale R. C., Duda J. J., Gelfenbaum G. R., Miller I. M., Pess G. R., Foley M. M., McCoy R., Ogston A. S. Morphodynamic evolution following sediment release from the world's largest dam removal // Scientific reports. 2018. No. 8. Art. 13279. doi: 10.1038/s41598-018-30817-8

References

Aleksandrova A. B., Ivanov D. V., Malanin V. V., Shurmina N. V., Galiakhmetova L. K., Bogdanova O. A. Indicators of accumulation and migration of heavy metals in the plain reservoir basin. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, Geography and Global Energy*. 2020;4(79):126–133. (In Russ.)

Baranova A. S. Mologa. Creation of the Rybinsk Reservoir. *Perelomnye momenty istorii: lyudi, sobytiya, issledovaniya: Materialy Mezhd. nauch. konf. (Sankt-Peterburg, 01 apr. 2022 g.) = Turning points in history: people, events, and research. Proceed. of the int. sci. conf. (St. Petersburg, Apr. 01, 2022)*. St. Petersburg; 2022. P. 138–142. (In Russ.)

Butorin N. V., Kurdina T. N., Bakastov S. S. Water and soil temperature of the Rybinsk Reservoir. *Leninograd: Nauka*; 1982. 221 p. (In Russ.)

Datsenko Yu. S., Puklakov V. V. Long-term changes of chemical balances in the Mozhaysk Reservoir. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2024;75:310–317. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317

Fashchevskaya T. B., Motovilov Yu. G., Kortunova K. V. Modeling genetic components of water and chemical runoff of heavy metals in the Nizhnekamsk Reservoir basin. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2023;50(4): 492–508. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059623040077

Filatova E. A. Flooded territories: assessing the possibility of restoring lost heritage. *Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2024;2(61):28–33. (In Russ.). doi: 10.25628/UNIIP.2024.61.2.004

Fomenko A. I. Zonal features of the chemical composition of small rivers in the Rybinsk Reservoir basin. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020;1:19–30. (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2020-1-2

Gerasimov Yu. V. Population dynamics of the Rybinsk Reservoir fishes throughout the whole period of its existence: role of natural and anthropogenic factors. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2015;156:67–90. (In Russ.)

GOST 31867-2012. Drinking water. Determination of anions content by chromatography and capillary electrophoresis method. (In Russ.)

GOST R 57162-2016. Water. Determination of elements content by graphite furnace atomic absorption spectrometry. (In Russ.)

GOST 31869-2012. Water. Methods for the determination of cations (ammonium, barium, potassium, calcium, lithium, magnesium, sodium, strontium) content using capillary electrophoresis. (In Russ.)

GOST 34100.3-2017 / ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement. (In Russ.)

Grigor'eva I. L., Kuzovlev V. V. Features of the winter hydrochemical regime of the Ivankovo Reservoir in the long-term aspect. *Vestnik Tverskogo gos. universiteta. Ser. Geografiya i geoekologiya = Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*. 2021;1(33):14–24. (In Russ.). doi: 10.26456/2226-7719-2021-1-14-24

Grzhibovskaya O. V. Mologa's paper reincarnation. *Rybinskie izvestiya = Rybinsk News*. 2012. (In Russ.) URL: <https://gazeta-rybinsk.ru/2012/04/18/4346> (accessed: 17.01.2026).

Ivanova N. In the name of Victory. *Vestnik RusGidro = RusHydro Bulletin*. 2016(7). (In Russ.). URL: <https://vestnik-rushydro.ru/articles/7-noyabr-2016/data/vo-imya-pobedy/> (accessed: 15.01.2026).

Kaletskaya M. L., Nemtsova S. F., Skokova N. N. Darwin Nature Reserve. *Zapovedniki SSSR. Zapovedniki evropeiskoi chasti RSFSR = Nature reserves of the USSR. Nature reserves of the European part of the RSFSR*. I. Moscow: Mysl'; 1988. P. 152–184. (In Russ.)

Kamenev V. I., Stepin Yu. I., Melikhova E. P. Factors influencing the quality of drinking water in Voronezh. *Rossiiskii vestnik gigieny = Russian Bulletin of Hygiene*. 2025;3:23–28. (In Russ.). doi: 10.24075/rbh.2025.137

Karimov A. The construction of the Rybinsk Reservoir is a great feat of the Soviet people. *KPRF. Yaroslavskoe oblastnoe otделение = Communist Party of the Russian Federation. Yaroslavl regional branch*. 03.02.2018. (In Russ.) URL: <https://yarkprf.ru/строительство-рыбинского-водохранилища/> (accessed: 18.01.2026).

Kashutina E. A., Yasinskii S. V., Rasulova A. M., Fasakhov M. A., Shaidulina A. A., Grishantseva E. S. Mass concentration of pollutants in the water of the Upper Volga reservoirs during years of varying water flow. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024;6:38–60. (In Russ.). doi: 10.35567/19994508-2024-6-38-60

Kravtsova A. V., Khodorovskaya N. I., Deryabina L. V. Complex characteristics of the state of the Shershnevsky Reservoir (Russia, Chelyabinsk). *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki = Scientific Review. Biological Sciences*. 2023;1:85–90. (In Russ.). doi: 10.17513/srbs.1319

Kuzin B. S. The Rybinsk Reservoir and its life. Leningrad: Nauka; 1972. 364 p. (In Russ.)

Lagutina N. V., Novikov A. V., Sumarukova O. V., Naumenko N. O. Assessment of the water quality of the Rybinsk Reservoir as a result of the water level lowering. *Prirodoobustroistvo = Environmental Engineering*. 2019;2:122–125. (In Russ.). doi: 10.34677/1997-6011/2019-2-122-126

Levels of hydroelectric power station reservoir. *PAO «RusGidro» = PJSC RusHydro*. (In Russ.). URL: <https://rushydro.ru/informer/> (accessed: 20.02.2026).

Levites V. V. Probability theory and mathematical statistics. Part 2: Mathematical Statistics. Murmansk: MAU; 2024. 108 p. (In Russ.)

Lipatnikova O. A., Lubkova T. N., Korobova N. A. Trace element speciation in water and bottom sediments of the Pirogov Reservoir. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya = Moscow University Bulletin. Ser. 4. Geology*. 2020;6:59–68. (In Russ.). doi: 10.33623/0579-9406-2020-6-59-68

Lozhkina R. A., Tomilina I. I., Gapeeva M. V. Long-term dynamics of the water quality in the Rybinsk Reservoir according to biotesting. *Transformatsiya ekosistem = Ecosystem Transformation*. 2020;3(3-9): 125–138. (In Russ.). doi: 10.23859/estr-200323

Malyshev N. A., Mal'tsev M. M. 25 years of Uglich and Rybinsk hydroelectric power plants: from the experience of construction and operation. Moscow-Leningrad: Ehnergiya; 1967. 311 p. (In Russ.)

Mamytova N. S., Akbayeva L. Kh., Kobetayeva N. K., Tulegenov Y. A., Makazhanov Y. J. Study of the self-cleaning ability of a reservoir and watercourses by hydrochemical indicators of Akmla region for 2018. *Vestnik Evraziiskogo natsional'nogo universiteta imeni L. N. Gumileva. Ser. Biologicheskie nauki = Bulletin of the L. N. Gumilyov Eurasian National University. Series: Biological Sciences*. 2022;2(139):86–96. doi: 10.32523/2616-7034-2022-139-2-86-96

Matlin G. M., Gokhshtein A. B., Kunakhovich G. D. Unified deep-water system of inland waterways of the European part of the USSR. Moscow: Transport; 1971. 129 p. (In Russ.)

Nokhrin D. Yu., Derkho M. A., Mukhamed'yarova L. G., Zhiwetina A. V. The structure of the variability of the hydrochemical composition of water in a lake-type reservoir. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya = Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2021;7(2):117–133. (In Russ.). doi: 10.37279/2413-1725-2021-7-2-117-133

Nikolaev V. A. Timber rafting experience on the Rybinsk Reservoir. Moscow; Leningrad: Goslesbumizdat; 1956. 51 p. (In Russ.)

On approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of pollutants in the waters of water bodies of fishery importance.

Order dated May 26, 2025, No. 296. Ministry of Agriculture of the Russian Federation; Federal Agency for Fisheries. Registered with the Ministry of Justice of Russia on June 2, 2025, No. 82497. (In Russ.)

Orlova A. Yu., Bogomolov A. V., Luchnikov A. I., Lyakhin Yu. S., Antonova M. V. Features of the formation of the water quality in the Argazinsky Reservoir during the low-level periods. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025;3:21–34. (In Russ.). doi: 10.35567/19994508-2025-3-21-34

PND F 14.1:2:4.128-98. Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring the mass concentration of petroleum products in samples of natural, drinking and waste waters using the fluorimetric method on a Fluorat-02 liquid analyzer. (In Russ.)

Regression equation. *Novyi semestr = A new semester*. (In Russ.). URL: <https://math.semestr.ru/corel/corel.php> (accessed: 21.02.2026).

Report of the State Enterprise of the Yaroslavl Region 'Svernoy Vodokanal'. Central Water Supply Laboratory. Rybinsk; 2024. 58 p. (In Russ.)

Ritchie A. C., Warrick J. A., East A. E., Magirl C. S., Stevens A. W., Bountry J. A., Randle T. J., Curran C. A., Hilldale R. C., Duda J. J., Gelfenbaum G. R., Miller I. M., Pess G. R., Foley M. M., McCoy R., Ogston A. S. Morphodynamic evolution following sediment release from the world's largest dam removal. *Scientific reports*. 2018;8:13279. doi: 10.1038/s41598-018-30817-8

Rybinsk Reservoir during the Great Patriotic War. *Press-sluzhba Minprirody Rossii = Press Service of the Ministry of Natural Resources of Russia*. (In Russ.). URL: https://www.mnr.gov.ru/press/75-let-pobedy/rybinskoe_vodokhranilishche_v_gody_velikoy_otechestvennoy_voyny/ (accessed: 21.01.2026).

Rybinsk Reservoir. *Federal'noe agentstvo vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii = Federal Agency for Water Resources of the Russian Federation*. (In Russ.) URL: <https://voda.gov.ru/reservoirs/7273/> (accessed: 10.01.2026).

Shirokova V. A., Snytko V. A., Nizovtsev V. A., Frolova N. L., Dmitruk N. G., Chesnov V. M., Ozerova N. A., Shirokov R. S. Tikhvin water system: past and present. Hydrological and ecological situation and landscape

changes in the waterway area. Moscow: Akkolit; 2013. 376 p. (In Russ.)

Shkardiyuk I. E. On a decline in the Rybinsk Reservoir. *Int. Sci. J. Alt. Energy Ecol*. 2013;3-2(122):91–94. (In Russ.)

Shubenkov M. V. Restoration of the flooded natural and cultural-historical territories of the Upper Volga region. *Biosfernaya sovместimost': chelovek, region, tekhnologii = Biosphere Compatibility: Human, Region, Technology*. 2024;1:25–36. (In Russ.). doi: 10.21869/2311-1518-2024-45-1-25-36

Stepan'yan O. V., Rybalkina E. I., Khoroshev O. A., Kazeev K. Sh., Nesteruk G. V., Kleshchenkov A. V., Pol'shin V. V., Gerasyyuk V. S. Use of bottom sediments of the Tsimlyansk Reservoir as organic fertilizer. *Nauka Yuga Rossii = Science in the South of Russia*. 2024; 20(4):61–69. (In Russ.). doi: 10.7868/S25000640240409

Tolkachev G. Yu., Korzhenevskii B. I., Kolomiitsev N. V. Distribution of heavy metals by forms of existence and their content in the bottom sediments of the reach of the Ivankovsky Reservoir. *Prirodoobustroistvo = Environmental Engineering*. 2023;1:89–94. (In Russ.). doi: 10.26897/1997-6011-2023-1-89-94

Vasil'ev Yu. S., Maslikov V. I., Shilin M. B. Regime of the flowing regulation of the Rybinsk Reservoir as a principal factor of formation of the ecological situation in the drainage area. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gos. gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2016;45:28–42. (In Russ.)

Venitsyanov E. V., Kirpichnikova N. V. Assessment of water quality in the system of reservoirs – sources of water supply in Moscow based on long-term dynamics of hydrochemical parameters. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020;45(8):571–578. doi: 10.3103/S1068373920080087

Zakonov V. V., Litvinov A. S., Zakonnova A. V. Spatial-temporal transformation of the ground complex of the Volga reservoirs. Communication 2. Results of monitoring bottom sediments and consequences of lowering the level of the Rybinsk Reservoir. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2015;4:21–35. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 27.01.2026; принята к публикации / accepted: 11.03.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Нартов Александр Сергеевич

канд. геогр. наук, доцент кафедры почвоведения, мелиорации и геоэкологии

e-mail: nartovalexander@gmail.com

Лаврухина Марина Анатольевна

магистрант кафедры почвоведения, мелиорации и геоэкологии

e-mail: lavruhina020@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Nartov, Alexander

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor

Lavrukhina, Marina

Master's Student

УДК 91(092)+91-057.4

НЕЗАБЫТЫЙ ГЕОГРАФ, СТАТИСТИК, ЭКОНОМИСТ, ИСТОРИК, АКАДЕМИК К. И. АРСЕНЬЕВ

Н. Н. Филатов^{1,2*}, А. В. Васильева³, Я. К. Июдина⁴, Д. Н. Кузнецов⁵,
Т. И. Рegerанд¹, А. В. Собисевич⁶

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*nfilatov@rambler.ru

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997)

³ Институт экономики КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (пр. А. Невского, 50,
Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030)

⁴ Республиканский центр по охране объектов культурного наследия (ул. Свердлова, 8,
Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185035)

⁵ Национальный музей Республики Карелия (пл. Ленина, 1, Петрозаводск, Республика
Карелия, Россия, 185035)

⁶ Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН (ул. Балтийская, 14,
Москва, Россия, 125315)

В статье рассказывается о предпринимаемых в Карелии шагах по увековечению памяти крупного ученого, государственного деятеля, патриота нашей страны Константина Ивановича Арсеньева. Именно в Петрозаводске он начинал свой путь ученого-статистика. Здесь им подготовлен первый труд по истории Олонецких заводов. Здесь же, в Петрозаводске, он упокоен в Крестовоздвиженском соборе. О жизни и деятельности Арсеньева в Олонецкой губернии долгие годы было мало что известно. Не имелось никаких памятных знаков, кроме таблички у его могилы в соборе. В музеях Карелии также отсутствовали материалы об этом деятеле, одном из самых титулованных в Олонецкой губернии. В конце XX – начале XXI века краеведы, преподаватели, исследователи попытались исправить ситуацию. В 1995 г. по инициативе Института экономики Карельского научного центра РАН стали проводиться регулярные конференции, посвященные памяти К. И. Арсеньева (Арсеньевские чтения). В Петрозаводске в 2015 г. появилась улица Академика Арсеньева. В 2025–2026 гг. Русское географическое общество поддержало грантом инициативу Института водных проблем Севера и Института экономики КарНЦ РАН по созданию передвижной выставки, посвященной К. И. Арсеньеву. Основная цель работы – знакомить специалистов, краеведов, жителей, туристов с жизнью и творчеством этого выдающегося человека. На десяти стендах выставки представлена деятельность К. И. Арсеньева как ученого-географа, экономиста, историка, академика, государственного деятеля и гражданина. Выставка будет демонстрироваться не только в Карелии, но и на его родине в Чухломе, а также в Санкт-Петербурге, Москве и других городах России.

Ключевые слова: К. И. Арсеньев; географ; статистик; экономист; историк; академик; географическое общество

Для цитирования: Филатов Н. Н., Васильева А. В., Июдина Я. К., Кузнецов Д. Н., Регеранд Т. И., Собисевич А. В. Незабывтый географ, статистик, экономист, историк, академик К. И. Арсеньев // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 125–137. doi: 10.17076/lim2376

Финансирование. Работа проводилась при поддержке гранта РГО 16/2025-P «Создание передвижной выставки «К. И. Арсеньев – выдающийся географ, статистик, один из организаторов Русского императорского географического общества».

N. N. Filatov^{1,2*}, A. V. Vasilyeva³, Y. K. Iudina⁴, D. N. Kuznetsov⁵, T. I. Regerand¹, A. V. Sobisevich⁶. AN UNFORGOTTEN GEOGRAPHER, STATISTICIAN, ECONOMIST, HISTORIAN, AND ACADEMICIAN – K. I. ARSENYEV

¹*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *nfilatov@rambler.ru*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36 Nakhimovsky Ave., 117997 Moscow, Russia)*

³*Institute of Economics, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

⁴*Republican Center for the Protection of Cultural Heritage (8 Sverdlov St., 185035 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

⁵*National Museum of the Republic of Karelia (1 Lenin Sq., 185035 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

⁶*Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences (14 Baltiiskaya St., 125315 Moscow, Russia)*

The readers are informed about the actions taken in Karelia to perpetuate the memory of a prominent scholar, statesman and patriot of our country Konstantin I. Arsenyev. Petrozavodsk is where he started his career in the science of statistics. This is where he prepared the first treatise on the history of Olonets plants. It is here, in Petrozavodsk, in the Cathedral of the Exaltation of the Holy Cross, that he now rests in peace. The life and work of Arsenyev in the Olonets Governorate had for many years remained obscure. There were no memorial signs apart from a plaque on his tomb in the cathedral. Museums of Karelia also contained no materials regarding this person – one of the province's most celebrated figures. In the late 20th – early 21st centuries, local lore explorers, educationists and researchers undertook to mend the situation. Since 1995, regular conferences honoring the memory of K. I. Arsenyev (Arsenyev's Readings) have been held, following the initiative of the Institute of Economics of the Karelian Research Centre RAS. In 2015, a street in Petrozavodsk was named after Academician Arsenyev. In 2025–2026, the Russian Geographical Society allocated a grant to support the initiative of the Northern Water Problems Institute KarRC RAS to create a mobile exhibition devoted to K. I. Arsenyev. The main objective of the effort is to familiarize specialists, local lore enthusiasts, citizens, and tourists with the life history and works of this outstanding man. The exhibition's ten stands illustrate Arsenyev's activities as a scholarly geographer, economist, historian, academician, statesman, and citizen. In addition to Karelia, the exhibition will be displayed in his native Chukhloma, as well as in St. Petersburg, Moscow, and other Russian cities.

Keywords: K. I. Arsenyev; geographer; statistician; economist; historian; academician; Geographical Society

For citation: Filatov N. N., Vasilyeva A. V., Iudina Y. K., Kuznetsov D. N., Regerand T. I., Sobisevich A. V. An unforgotten geographer, statistician, economist, historian, and academician – K. I. Arsenyev. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 125–137. doi: 10.17076/lim2376

Funding. The work was supported by the Russian Geographical Society grant No. 16/2025-P for the project “K. I. Arsenyev – an outstanding geographer, statistician, and one of the organizers of the Russian Imperial Geographical Society”.

Введение

Жизнь и деятельность Константина Ивановича Арсеньева, выдающегося русского географа, экономиста, историка, одного из учредителей Русского императорского географического общества, государственного деятеля, академика, была связана с Карелией (в то время Олонецкой губернией). Об Арсеньеве имеется немало публикаций. Это обстоятельные монографии П. П. Пекарского [1872], Н. П. Никитина [1948] и Е. К. Перцика [1960], статьи [Баранский, 1957; Григорьев, 1973; Кирикова, 2018; Тишков, 2024]. Однако кроме книг и материалов, которые хранятся в архивах и библиотеках, до конца XX века мало что было сделано для увековечения памяти этого известного ученого и титулованного государственного деятеля, жившего, работавшего и упокоившегося в Карелии. Отечественный экономико-географ и представитель районной школы экономической географии Ю. Г. Саушкин [1980] считал, что *«Арсеньева можно назвать «отцом» теории и практики географического (экономического) районирования не только в русской, но и в мировой географической науке»*. В настоящей статье не будем подробно повторять биографию Константина Ивановича, написанную признанными специалистами-биографами, но коснемся важных событий его жизни и деятельности. На протяжении последних 20 лет краеведы, преподаватели и исследователи Карелии писали об Арсеньеве, предлагали варианты достойного сохранения памяти о нем [Пашков, 1997; Немкович, 2002; Литвин, 2005; Литвин и др., 2007]. Исследователь Ю. В. Савельев написал статью «Петрозаводск как родина российской статистики. Забытый гений» [2016], в которой отмечал, что *«именно в г. Петрозаводске зародилась идея написания первого комплексного статистического описания Российского государства и Петрозаводск по праву может считаться родиной российской статистики. Поэтому важно что-то сделать, чтобы не было забыто наследие не только Константина Ивановича, но и целой династии Арсеньевых – патриотов своей страны, ученых, государственных и общественных деятелей, историков»*. Немногое было известно о деятельности Арсеньева в Петрозаводске в 1812–1813 гг., когда в период эвакуации он занимался историей Олонецких заводов и подготовил свой первый научный труд «Описание Олонецких заводов с самого их основания, до последних времен, с кратким обозрением Олонецкой губернии» [Арсеньев, 1830]. А после того как вышел в отставку и тяжело заболел,

Арсеньев снова оказался в Петрозаводске, в семье своего старшего сына Юлия Константиновича, который в то время был Олонецким губернатором. В Петрозаводске же К. И. Арсеньев скончался в 1865 г. и нашел упокоение в Крестовоздвиженском соборе. Долго биографы Арсеньева и историки не могли установить место его захоронения, хотя у его могилы установлена небольшая табличка. В настоящее время могила Арсеньева является объектом историко-культурного наследия, что подчеркивает значимость ученого [Могила..., 2013]. Тем не менее до сих пор ни в одном музее Карелии нет экспозиции об Арсеньеве.

В 2015 г. благодаря инициативе Института экономики КарНЦ РАН в Петрозаводске в микрорайоне Древлянка появилась улица Академика Арсеньева (<https://petrozavodsk.bezformata.com/listnews/ulitci-nazvanniev-chest-akademika/42382351/> (дата обращения: 15.04.2026)). И все же этого крайне недостаточно для увековечения памяти о таком выдающемся человеке.

Жизнь и деятельность К. И. Арсеньева

Константин Иванович Арсеньев родился 12 (23) октября 1789 г. в селе Мироханово Чухломского уезда Костромской губернии (рис. 1) в семье приходского священника Иоанна Васильевича Арсеньева. О своем детстве и юности К. И. Арсеньев рассказывает в автобиографии. По его словам, детство проходило «мирно». Он вспоминает, как его возили в село Агутино к деду, который также был священником, *«именно под руководством которого я сделал первые начатки учения — научился читать»* [Костромская..., 1894].

Как сын священника, К. И. Арсеньев мог продолжить карьеру отца, и в 1799 г. он поступил в Костромскую духовную семинарию, где проучился до 1806 г. В своих воспоминаниях он отмечал низкое качество образования в семинарии и писал о своих учителях следующее: *«О развитии понятий детей они не заботились – учили, чему учились сами за двадцать, тридцать лет; за успехами в науках не следовали и не могли; держась старинных руководств, заставляли твердить все на память; просматривать или прослушивать заданный урок считали они единственную свою обязанностью»* [Пекарский, 1872].

А. Ю. Скрыдлов отмечает, что пробелы в преподавании учебных дисциплин К. И. Арсеньев старался компенсировать самообразованием и *«читал все, что ему попадалось, без всякого разбора»* [Скрыдлов, 2020].



Рис. 1. Церковь в селе Мироханово, на родине К. И. Арсеньева
Fig. 1. Church in the village of Mirokhanovo, the birthplace of K. I. Arsenyev

Однако при всех своих недостатках духовная гимназия давала образование достаточное для поступления в университет. В составе группы лучших воспитанников семинарии К. И. Арсеньев был направлен в Главный педагогический институт в Санкт-Петербурге. Учеба давалась Арсеньеву нелегко по причине бедности его родителей. Будучи «казенно-коштным» студентом, он очень сильно зависел от государственной помощи, получая деньги на покупку одежды и самых необходимых вещей [ЦГИА СПб. Ф. 13, оп. 1, д. 1002]. Положение К. И. Арсеньева улучшается после того, как в конце 1811 г., окончив институт, он получает там должность преподавателя и жалование [ЦГИА СПб. Ф. 13, оп. 1, д. 1029].

Константин Иванович в своих воспоминаниях пишет, что первые два года обучения он не обратил на себя внимания преподавателей. Однако все изменилось, и «На третьем году нашего курса я стоял уже в ряду отличных студентов по предметам истории, географии, статистики и политической экономии. Я любил страстно историю... и приобретал познания не от уроков преподавания скучного, но от чтения знаменитых писателей» [Пекарский, 1872]. Преподаватели отмечали Арсеньева среди других студентов и оказывали ему всяческую поддержку. Особенным расположением он также пользовался у профессоров Е. Ф. Зябловского, Г. И. Терлаича, К. Ф. Германа и М. А. Болугьянского [Пекарский, 1872].

В 1810 г. К. И. Арсеньев, будучи студентом старших курсов, стал практиковаться в преподавании под наблюдением своих профессоров.

В конце года, успешно выдержав выпускные испытания, он был рекомендован в числе четырех лучших студентов к отправке за границу. Арсеньев в своих воспоминаниях отмечал, что «это назначение считал я верхом благополучия; в душе моей благословлял Бога за осуществление любимой мечты моей, с которою я безмолвно носился в продолжении нескольких лет!» [Пекарский, 1872]. Однако напряженность в предвоенной Европе начала XIX в., которая ожидала новых шагов французского императора Наполеона, не позволила состояться поездке.

В конце 1811 г. К. И. Арсеньев начинает преподавать в институте латинский язык и географию. В этом же году он вместе со студентами Левинским и Розовым был представлен к присвоению чина титулярного советника. Этот гражданский чин относился к IX классу в Табели о рангах Российской империи и часто присваивался чиновникам с высшим образованием. Чин титулярного советника К. И. Арсеньеву был присвоен в 1812 г.

После окончания обучения К. И. Арсеньев был оставлен в институте преподавать географию в помощь Е. Ф. Зябловскому, который первоначально покровительствовал Константину Ивановичу. Позднее Арсеньев находит покровительство у профессора К. Ф. Германа, который к этому времени уже считался крупнейшим специалистом в области статистики.

Свои первые труды К. И. Арсеньев создавал под впечатлением от лекций и работ свое-

го учителя в рамках нового в то время направления в статистике – «государствоведения» [Скрыдлов, 2020]. Основной акцент при этом делался на качественном, а не количественном анализе, который позже развился в современную статистику. В 1810–1811 гг. К. Ф. Герман занимался организацией статистического отделения при Министерстве полиции.

Во время Отечественной войны в 1812 г. при нашествии войск Наполеона К. И. Арсеньев вместе с другими преподавателями и студентами педагогического института был эвакуирован в Петрозаводск. Находясь в Олонецкой губернии, он занялся историей Олонецких горных заводов. Результатом работы стал статистический очерк, представленный автором в статистическое отделение Министерства полиции. В доработанном виде очерк увидел свет гораздо позднее, только в 1830 г. К. И. Арсеньев опубликовал свое первое географо-статистическое исследование «Описание Олонецких заводов, с самого их основания, до последних времен, с кратким обозрением Олонецкой губернии» в «Трудах Минералогического общества». Во вступлении к этой работе он писал: *«Россия удивительно разнообразна и в ужасах и в прелестях природы. В разных частях ее мы найдем и грозные Швейцарские Альпы, и прекрасные долины Пиемонта. Южные страны богаты, северные бедны, но как те, так и другие равно любопытны для наблюдателя. Олонецкая губерния заслуживает гораздо обстоятельнейшее описание, нежели какое доставлено нам путешествовавшими в оное учеными. Я ничего почти не могу прибавить нового в рассуждении сего края, однако же не считаю бесполезным указать на некоторые достопримечательности, которые имел случай видеть сам, или узнать от людей сведущих и давно уже в сем крае живущих»* [Арсеньев, 1930].

В 1813 г. К. И. Арсеньев возвращается в Педагогический институт и по совету начальника института Е. А. Энгельгарта готовит диссертацию для занятия должности адъюнкта, в которой впервые излагает свое виденье логики и направленности географического освоения поверхности земного шара. Работа получила высокую оценку адмирала И. Ф. Крузенштерна, к которому руководство института обратилось за рецензией. Однако бывший наставник ученого Е. Ф. Зябловский, ставший его «недругом», приложил множество усилий, чтобы назначение адъюнктом не состоялось. Только в 1817 г. К. И. Арсеньев был утвержден в звании и должности адъюнкта географии и статистики, что побудило его начать работу над книгами. В 1818 г. он публикует свою первую крупную гео-

графическую работу «Краткая всеобщая география» [Арсеньев, 1818а], которая была отмечена журналами «Сын отечества» и «Русский инвалид». В том же году выходит работа «Обозрение физического состояния России и выгод от того проистекающих для народных промыслов ныне существующих» [Арсеньев, 1818в].

В 1818 г. увидела свет еще одна работа К. И. Арсеньева «Начертание статистики Российского государства», где впервые в основу районирования России было положено *«сходство губерний между собой по климату, качеству земли, произведениям природы и промышленности»* [Арсеньев, 1818б]. Этот труд объединил географические, демографические и экономические данные, заложив основы отечественной статистической науки и экономической географии. Но одновременно вызвал критику недоброжелателей К. И. Арсеньева, один из которых, М. Л. Магницкий, впоследствии пытался использовать эту работу для увольнения ученого. В 1819 г. Педагогический институт был преобразован в Петербургский университет (рис. 2), и членом его правления становится Д. П. Рунич, который решает проверить благонадежность преподающих в университете профессоров.

К. Ф. Герман и К. И. Арсеньев отказались предоставлять для проверки материалы своих лекций, сказав, что читают их по памяти, поэтому у студентов были изъяты конспекты, которые проверялись на наличие «вредных мест». В 1821 г. возникло известное в кругах образованного населения Российской империи «дело профессоров» [Пекарский, 1872]. В сентябре 1821 г. К. И. Арсеньеву было запрещено читать лекции студентам, а сам он находился под университетским судом [Пекарский, 1872]. Снисхождение к обвиняемым проявилось в разрешении им вернуться на педагогическую и академическую службу от графа Е. К. Сиверса, который пригласил Арсеньева преподавать в Главное инженерное училище. Здесь талант Константина Ивановича заметил младший брат императора Александра I, генерал-инспектор по артиллерийской части Николай Павлович, который пригласил ученого читать историю и статистику в артиллерийском училище. С этого времени великий князь Николай Павлович стал защищать Арсеньева от недоброжелателей. Желая поддержать ученого, Николай Павлович назначил его в 1823 г. преподавателем школы гвардейских прапорщиков. Несмотря на преследование, в 1822 г. Арсеньеву был присвоен чин «надворного советника со старшинством». Присвоение следующего чина «надворного советника»,



Рис. 2. Университет [Живописная..., 1881]

Fig. 2. University [Picturesque..., 1881]

соответствующего званию полковника, произошло, по всей видимости, в начале 1825 г. Несмотря на то что К. И. Арсеньев мог продолжать работать в Санкт-Петербургском университете, в 1824 г. он оттуда уволился и стал редактором в комиссии составления законов [РГВИА. Ф. 395, оп. 131, д. 343]. В 1826 г., через год после восшествия на престол великого князя Николая Павловича, императора Николая I, комиссия была преобразована во Второе отделение Собственной Его Императорского Величества канцелярии, которое возглавил реформатор государственной системы М. М. Сперанский.

В 1828 г. К. И. Арсеньев как высокоодаренный педагог начинает преподавать статистику и историю сыну императора Николая I, будущему императору Александру II. В 1837 г. он сопровождал великого князя Александра Николаевича в его путешествии по России. В свите великого князя К. И. Арсеньев объехал центральные губернии Европейской России, Северный Кавказ, Закавказье, Крым и Западную Сибирь. В дороге ученый собирал статистические сведения о «*достопримечательностях каждого встречавшегося на пути города и селения*» [Скрыдлов, 2020]. Возможно, мысль об отмене крепостного права была высказана ученым будущему императору во время этой поездки.

Среди современников Арсеньева трудно было бы назвать другого ученого, кто проделал бы столько систематических путешествий по России с целью ее экономико-географического изучения. Многогранная и глубокая эрудиция, талант писателя создали Арсеньеву широкую

известность. Например, в 1834 г. его видели в доме П. А. Плетнева беседующим с Пушкиным.

В 1832 г. К. А. Арсеньев публикует «Гидрографическо-статистическое описание городов Российской империи», которое считается одной из первых географий городов. В работе характеристики городов давались с учетом их географического положения относительно водных путей, а также впервые было предложено гидрологическое районирование страны на 15 «гидрографических округов» по бассейнам крупных рек. Отметим, что «бассейновый» принцип управления водными ресурсами действует и в настоящее время.

В период с 1832 по 1853 г. К. И. Арсеньев находился в статусе члена совета Министерства внутренних дел, заведовал работами статистического комитета, учрежденного при министерстве. С 1832 г. ученый возглавлял Статистическое отделение, работая под началом министра внутренних дел Д. Н. Блудова, и прослужил там до 1853 г. Сбор статистических данных Арсеньев осуществлял во время своих многочисленных путешествий. При этом ученый пытался не только дать справку о текущем состоянии исследуемых объектов, но и составить динамические ряды для соответствующих показателей, выявить закономерности и взаимозависимости социально-демографических и хозяйственных процессов, что можно считать новым подходом для того времени.

Научная деятельность К. И. Арсеньева была необычайно плодотворной. В 1841 г. он был избран действительным членом Российской академии наук.



Рис. 3. Карта путешествий К. И. Арсеньева (из кн. Е. Н. Перцика [1960])

Fig. 3. Map of K. I. Arsenyev's travels (from the book by E. N. Pertsik [1960])

В какой-то момент К. И. Арсеньев пришел к мысли о необходимости вовлечения в географическое изучение страны более широких кругов населения и о целесообразности создания для этого широкой научной и общественной организации. Вместе с Ф. П. Литке он был одним из главных инициаторов создания Русского географического общества (РГО), основанного по высочайшему повелению Николая I в 1845 году. Горячую поддержку идея создания географического общества нашла у русских моряков (Ф. П. Врангеля, И. Ф. Крузенштерна), академиков (К. М. Бэра, В. Я. Струве, П. И. Кеппена и др.), офицеров генерального штаба (Ф. Ф. Берга, М. И. Вронченко, М. Н. Муравьева), известных географов, писателей, поэтов, путешественников (В. И. Даля, П. А. Чихачева, В. Ф. Одоевского и др.). Таким образом, с именем Арсеньева тесно связано одно из самых больших начинаний в русской географии – создание Русского географического общества. В разные годы обществом руководили представители Российского императорского дома, ученые и государственные деятели. Уже в XIX в. РГО внесло значительный вклад в изучение Европейской России, Камчатки, Урала, Сибири, Дальнего Востока, Средней и Центральной Азии, Кавказа, а также Ирана, Индии, Новой Гвинеи и других территорий. Общество заложило основы охраны природы и отечественного заповедного дела.

«Основная идея почтенных учредителей Общества заключалась в том, чтобы привлечь к осуществлению широко поставленной ими цели – изучения родной земли и людей, ее обитающих, – все лучшие силы русской земли и работать вместе с ними на пользу и славу дорогого отечества» [Семенов-Тянь-Шанский, 1896].

Константин Иванович активно участвует в деятельности РГО, даже избирается в 1850 г. помощником председателя общества – великого князя Константина, а в 1851 г. становится председателем редакционного совета «Вестника Русского географического общества», который издается и в наши дни как «Известия Русского географического общества».

В 1848 г. опубликована наиболее крупная работа К. И. Арсеньева «Статистические очерки России» [Арсеньев, 1848], в которой он обосновал новую сетку из 15 хозяйственных районов страны, что имело большую научную новизну (рис. 4). В работе приводится не только обоснование выделения экономических районов, но и их комплексная географическая и экономическая характеристика. В 1849 г. книга удостоена Жуковской премии Русского императорского географического общества. В этой и других работах К. И. Арсеньева разрозненные данные превращались в целостное статистическое исследование с конкретными целями и задачами. Под его руководством началась



Рис. 4. Районирование России по К. И. Арсеньеву, 1848 г.

Пространства: I – Северное, II – Алаунское, III – Балтийское, IV – Низменное, V – Карпатское, VI – Степное, VII – Центральное, или внутреннее, VIII – Уральское, IX – Кавказ, X – Сибирь (из кн. Е. Н. Перцика [1960])

Fig. 4. Zoning of Russia by K. I. Arsenyev, 1848.

Areas: I – Northern, II – Alaun, III – Baltic, IV – Lowland, V – Carpathian, VI – Steppe, VII – Central, or internal, VIII – Ural, IX – Caucasus, X – Siberia (from the book by E. N. Pertsik [1960])

работа по унификации методов и процессов систематизации сбора данных в статистических учреждениях страны. За время работы К. И. Арсеньева в Статистическом отделении МВД организация русской статистики добилась значительного прогресса и успехов, обогатившись новыми подходами к сбору, анализу и интерпретации статистических данных.

Константин Иванович является основоположником районной экономической географии в России. В своих статистических работах он выделяет крупные хозяйственные районы страны, которые подразделяет на подрайоны и микрорайоны. Благодаря К. И. Арсеньеву современные историки располагают подробным описанием экономических, административных, хозяйственных и социальных реформ,

проводимых Петром Великим и Екатериной I. По материалам государственного архива Константином Ивановичем были написаны исчерпывающие сочинения, посвященные их царствованию. Также историческая наука обязана К. И. Арсеньеву и отысканием знаменитой записки Николая Карамзина «О древней и новой России».

К. И. Арсеньев награжден орденами Белого орла, Святой Анны и Святого Станислава I степени, Святого Владимира II степени, а 30 мая 1833 г. К. И. Арсеньеву был пожалован герб, на котором изображен глобус (рис. 5).

Константин Иванович Арсеньев и его жена Мария Карловна воспитали достойных детей. Дочь Мария Константиновна, в замужестве Прилуцкая, приходится прабабушкой

Рис. 5. Герб Арсеньевых (<https://gerbovnik.ru/arms/3382.htm>)

Fig. 5. The Arsenyev family coat of arms (<https://gerbovnik.ru/arms/3382.htm>)

И. С. Глазунову, академику Российской академии художеств. Младший сын Константин Константинович (1837–1919) стал выдающимся адвокатом, академиком по отделению русского языка и словесности Академии наук, главным редактором «Нового энциклопедического словаря» Ф. А. Брокгауза и И. А. Ефрона. Николай Константинович (1826–1905) в 1867–1874 гг. служил костромским, затем казанским вице-губернатором. Старший сын Юлий Константинович (1818–1873) в 1862 году был назначен

на должность губернатора Олонецкой губернии (Олонецкие губернские ведомости. № 41 от 27 октября 1862 г. С. 1) и прослужил до 1870 г. Он был сторонником политики реформ Александра II и обеспечил решение крестьянского вопроса в подчиненной ему губернии. В семье Юлия Константиновича и его супруги Софьи Дмитриевны в Петрозаводске провел последние месяцы жизни академик К. И. Арсеньев, который в 1861 г. вышел в отставку, тяжело заболел и в 1864 г. переехал в Петрозаводск к старшему сыну. Семья проживала в Губернаторском доме, который сохранился и в настоящее время (рис. 6).

29 ноября 1865 г. Константин Иванович скончался и был упокоен в г. Петрозаводске на территории Крестовоздвиженского собора (рис. 7). Его могила является объектом историко-культурного наследия города Петрозаводска.

Сохранение исторической памяти о выдающемся деятеле государства

По инициативе и силами Отделения РГО в Республике Карелия, Института водных проблем Севера и Института экономики КарНЦ РАН в Петрозаводске создана передвижная выставка «К. И. Арсеньев – выдающийся географ, статистик, один из организаторов Русского императорского географического общества». В 2025 г. Русское географическое общество поддержало эту идею грантом.



Рис. 6. Губернаторский дом. Петрозаводск. 1901 г. Автор съемки И. А. Никольский. Фото из Архива РК. Сейчас это здание Национального музея Республики Карелия

Fig. 6. Governor's House. Petrozavodsk. 1901. Photograph by I. A. Nikolsky. The photograph is from the Archives of the Republic of Karelia. Now it houses the National Museum of the Republic of Karelia



Рис. 7. Крестовоздвиженский собор и табличка на месте упокоения К. И. Арсеньева

Fig. 7. Plaque at the burial place of K. I. Arsenyev in the Cathedral of the Exaltation of the Holy Cross

Основная цель выставки – знакомить специалистов, краеведов, жителей, туристов с жизнью и творчеством К. И. Арсеньева. Почему решено было создать именно передвижную выставку? Это важно для повышения эффективности организации научно-просветительных, патриотических мероприятий на различных площадках с целью усиления общественной значимости деятельности К. И. Арсеньева как выдающегося ученого-экономиста, географа и историка, государственного деятеля. Такую выставку можно будет демонстрировать не только в городах, но и в удаленных районах Карелии. Она позволит охватить аудитории разного уровня – школьников, студентов, преподавателей, научную общественность, представителей разных ведомств, туристов. Авторы хотели обратить внимание на связь исследований К. И. Арсеньева с Карелией (Олонецкой губернией) и Петрозаводском.

В результате работы в архивах и библиотеках РГО, КарНЦ РАН, в Государственном архиве Республики Карелия и др. в 2025–2026 гг. создано десять передвижных стендов выставки

(Титульный, Время и место рождения, Ученик, Преподаватель, Государственный деятель, Экономист, Статистик, Один из учредителей РГО, Семьянин, Память), которые, надеемся, убеждают, что вовсе не забыт К. И. Арсеньев как ученый-географ, экономист, историк, академик, государственный деятель и гражданин (<https://www.rgo.ru/ru/article/uchenyy-совет-otdeleniya-rgo-v-karelii-utverdil-vystavku-posvyashchennuyu-vydayushchemusya> (дата обращения: 15.04.2026)).

Дизайн выставки выполнен в формате раздвижных стендов со встроенным механизмом автоматического сматывания, поэтому выставка может быть представлена в различных помещениях, включая школы, визит-центры ООПТ, конференц-залы, библиотеки и т. д. На стендах напечатаны различные документы и фотографии. Интерактивные элементы (игры, мультимедиа-установки, другие активности) также будут доступны посетителям.

Выставка может быть использована в образовательных программах: на площадках ее размещения организации могут подготовить различные тематические лекции и семинары по обсуждению работ К. И. Арсеньева в соответствии с направлением своей деятельности.

Предназначена выставка для людей любого возраста, но наиболее важной эта информация будет для школьников и студентов. Особая аудитория – участники научно-практической конференции «Арсеньевские чтения», которая проводится с 1995 года Институтом экономики КарНЦ РАН.

Выставка прошла пробную демонстрацию в заповеднике «Костомукшский» (г. Костомукша) 5–10 апреля 2026 г.

Торжественное открытие выставки планируется в мае 2026 г. в Карельском научном центре РАН (г. Петрозаводск). Несмотря на ее компактность, стенды информационно насыщены, но в то же время не перегружены: посетители смогут узнать много нового о выдающемся деятеле и страницах его биографии, в том числе связанных с Петрозаводском, о его вкладе в создание Русского географического общества. Удобный формат экспозиции позволяет без труда перевозить ее – это значит, что о Константине Ивановиче Арсеньеве смогут больше узнать жители не только Петрозаводска, но и других городов. Планируется, что передвижная выставка будет экспонироваться в Карельском научном центре РАН, Национальной библиотеке РК, в городах и национальных парках республики, а также на родине К. И. Арсеньева в Чухломе, в штаб-квартире РГО в Санкт-Петербурге, в Москве и других городах России.



Рис. 8. Выставка в заповеднике «Костомукшский», 5–10 апреля 2026 г.
 Fig. 8. Exhibition in the Kostomuksha Nature Reserve (the city of Kostomuksha), April 5-10, 2026

Авторы благодарят за помощь в работе коллег из Национального архива Республики Карелия, архива штаб-квартиры и библиотеки РГО в Санкт-Петербурге, библиотеки КарНЦ РАН, Республиканского центра по охране объектов культурного наследия Республики Карелия, а также коллег-географов из Костромского отделения РГО.

Литература

- Арсеньев К. И. Краткая всеобщая география. СПб.: Мед. тип., 1818а. 325 с.
 Арсеньев К. И. Начертание статистики Российского государства. Ч. 1: О состоянии народа. СПб.: тип. Имп. Воспитательного дома, 1818б. 245 с.
 Арсеньев К. И. Описание Олонецких заводов, с самого их основания, до последних времен,

с кратким обзором Олонецкой губернии // Тр. Минерал. о-ва. Т. 1. СПб.: тип. Н. Греча, 1830. С. 281–332.

Арсеньев К. И. Обзорение физического состояния России и выгод от того проистекающих для народных промыслов ныне существующих. СПб.: тип. Департамента народного просвещения, 1818в. 50 с.

Арсеньев К. И. Статистические очерки России. Сочинение Константина Арсеньева. СПб.: тип. Имп. Акад. наук, 1848. 503 с.

Баранский Н. Н. Константин Иванович Арсеньев // Отечественные экономико-географы XVIII–XX вв. / Под ред. Н. Н. Баранского, Н. П. Никитина, Ю. Г. Саушкина. М.: Учпедгиз, 1957. С. 134–140.

Григорьев С. В. Биографический словарь: естествознание и техника в Карелии / Гос. публ. б-ка КАССР; Карел. фил. Акад. наук СССР. Петрозаводск: Карелия, 1973. С. 48–49.

Живописная Россия: Отечество наше в его земельном, историческом, племенном, экономическом и бытовом значении / Под ред. П. П. Семенова. Т. 1, ч. 1: Северная Россия. Север и Северо-Восток Европейской России. Озерная или Древне-Новгородская область. СПб.: Тип М. О. Вольф, 1881. 492 с.

Кирикова О. А. Арсеньев Константин Иванович // *Материалы и исследования по истории науки*. Вып. 13. Ученые – фондообразователи Санкт-Петербургского филиала Архива Российской академии наук / Науч. ред. и сост. Е. Ю. Басаргина, И. В. Тункина. СПб.: Реноме, 2018. С. 29–31. doi: 10.25990/ze0m-ca72

Костромская старина. Сборник, издаваемый Костромскою губернской ученою архивною комиссией. Вып. 3. Отделение III. Описания частных архивов и собраний отдельных рукописей. Кострома: губ. тип., 1894. С. 44.

Литвин А. С. Тайный советник Арсеньев – символ Петрозаводска // *Карелия*. 2005. № 108. 29 сент. С. 14.

Литвин А. С., Кораблев Н. А., Немкович Е. Г. Арсеньев Константин Иванович // *Карелия: энциклопедия*. В 3 т. Т. 1. А–Й. Петрозаводск: ПетроПресс, 2007. С. 132–133.

Могилы К. И. Арсеньева, ученого-географа, статистика // *Объекты историко-культурного наследия города Петрозаводска / Республиканский центр по государственной охране объектов культурного наследия*. Петрозаводск, 2013. С. 92.

Немкович Е. Деятельность его безупречна...: К. И. Арсеньев в Петрозаводске // *Молодежная газета Карелии*. 2002. 31 окт. – 6 нояб. С. 5.

Никитин Н. П. Академик К. И. Арсеньев и его роль в развитии экономической географии в России // *Вопросы географии*. Вып. 10. М., 1948.

Пашков А. М. К. И. Арсеньев в Петрозаводске // *Север*. 1997. № 2–3. С. 155–160.

Пекарский П. П. О жизни и трудах К. И. Арсеньева // *Сборник отделения русского языка и словесности Академии наук*. СПб., 1872. Т. IX.

Перцик Е. Н. К. И. Арсеньев и его работы по районированию России. М.: Географгиз, 1960.

Российский государственный военно-исторический архив (в тексте РГВИА).

Савельев Ю. В. Петрозаводск как родина российской статистики. Забытый гений // *Республика [Электронный ресурс]*. 2016. URL: <https://rk.karelia.ru/social/science/petrozavodsk-kak-rodina-rossijskoj-statistiki/> (дата обращения: 15.04.2026).

Саушкин Ю. Г. Географическая наука в прошлом, настоящем, будущем. М.: Просвещение, 1980. Стр. 53.

Семенов-Тянь-Шанский П. П. История полувековой деятельности Русского географического общества (1845–1895). СПб., 1896. Т. 1. С. 1–22.

Скрыдлов А. Ю. Ученый-статистик и государственная власть в первой половине XIX в.: к биографии К. И. Арсеньева (1789–1865) // *Genesis: исторические исследования*. 2020. № 11. С. 37–47. doi: 10.25136/2409-868X.2020.11.34470

Тишков А. А. Краткая история академической географии в России: этапы, достижения, действующие лица. М.: Геос, 2024. 215 с.

Центральный государственный исторический архив Санкт-Петербурга (в тексте ЦГИА СПб).

References

Arsenyev K. I. Brief universal geography. St. Petersburg: Med. tip.; 1818. 325 p. (In Russ.)

Arsenyev K. I. An outline of the statistics of the Russian state. Part 1: On the state of the people. St. Petersburg: tip. Imp. Vospitatel'nogo doma; 1818. 245 p. (In Russ.)

Arsenyev K. I. Description of the Olonets plants, from their foundation until recent times, with a brief overview of the Olonets Province. *Tr. Mineral. o-va = Proceedings of the Mineral Society*. Vol. 1. St. Petersburg: tip. N. Grecha; 1830. P. 281–332. (In Russ.)

Arsenyev K. I. A review of the physical condition of Russia and the benefits resulting from it for the current folk crafts. St. Petersburg: tip. Departamenta narodnogo prosveshcheniya; 1818. 50 p. (In Russ.)

Arsenyev K. I. Statistical essays on Russia. The work of Konstantin Arsenyev. St. Petersburg: tip. Imp. Akad. nauk; 1848. 503 p. (In Russ.)

Baranskii N. N. Konstantin Ivanovich Arsenyev. *Otechestvennye ekonomiko-geografy XVIII–XX vv. = Russian economic geographers of the 18th–20th centuries*. Moscow: Uchpedgiz; 1957. P. 134–140. (In Russ.)

Central State Historical Archives of St. Petersburg (CSHA (TsGIA) of St. Petersburg) – ЦГИА СПб in the text. (In Russ.)

Grigor'ev S. V. Biographical dictionary: natural sciences and technologies in Karelia. Petrozavodsk: Kareliya; 1973. P. 48–49. (In Russ.)

Kirikova O. A. Arsenyev Konstantin Ivanovich. *Materialy i issledovaniya po istorii nauki. Vyp. 13. Uchenye – fondoobrazovateli Sankt-Peterburgskogo filiala Arkhiva Rossiiskoi akademii nauk = Materials and research on the history of science. Iss. 13. Scientists – founders of the collection of the St. Petersburg Branch of the Archives of the Russian Academy of Sciences*. St. Petersburg: Renome; 2018. P. 29–31. (In Russ.). doi: 10.25990/ze0m-ca72

Kostroma antiquity. Collected works published by the Kostroma Provincial Scientific Archival Commission. Iss. 3. Part III. Descriptions of private archives and collections of individual manuscripts. Kostroma: губ. tip.; 1894. P. 44.

Litvin A. S. Privy Councilor Arsenyev – a symbol of Petrozavodsk. *Kareliya = Karelia*. 2005;108:14. (In Russ.)

Litvin A. S., Korablev N. A., Nemkovich E. G. Arsenyev Konstantin Ivanovich. *Kareliya: entsiklopediya = Karelia: encyclopedia*. Vol. 1. Petrozavodsk: PetroPress; 2007. P. 132–133. (In Russ.)

Nemkovich E. His activities are impeccable...: K. I. Arsenyev in Petrozavodsk. *Molodezhnaya gazeta Karelii = Youth Newspaper of Karelia*. 2002. Oct. 31 – Nov. 6. P. 5. (In Russ.)

Nikitin N. P. Academician K. I. Arsenyev and his role in the development of economic geography in Russia. *Voprosy geografii = Issues of Geography*. Iss. 10. Moscow; 1948. (In Russ.)

Pashkov A. M. K. I. Arsenyev in Petrozavodsk. *Sever = The North*. 1997;2–3:155–160. (In Russ.)

Pekarskii P. P. On the life and works of K. I. Arsenyev. *Sbornik otdeleniya russkogo yazyka i slovesnosti Akademii nauk = Proceedings of the Department of Russian Language and Literature of the Academy of Sciences*. St. Petersburg; 1872. Vol. IX. (In Russ.)

Pertsik E. N. K. I. Arsenyev and his works on the zoning of Russia. Moscow: Geografiz; 1960. (In Russ.)

Russian State Military Historical Archives (RGVIA, RSMHA) – РГВИА in the text. (In Russ.)

Savel'ev Yu. V. Petrozavodsk as the birthplace of Russian statistics. A forgotten genius. *Respublika = Republic*. 2016. (In Russ.) URL: <https://rk.karelia.ru/social/science/petrozavodsk-kak-rodina-rossijskoj-statistiki/> (accessed: 15.04.2026).

Saushkin Yu. G. Geographical science in the past, present, and future. Moscow: Prosveshchenie; 1980. P. 53. (In Russ.)

Semenov P. P. (ed.). Picturesque Russia: our Fatherland in its land, historical, tribal, economic, and everyday meanings. Vol. 1, Part 1: Northern Russia.

North and Northeast of European Russia. Lake or Ancient Novgorod Region. St. Petersburg: tip M. O. Vol'f; 1881. 492 p. (In Russ.)

Semenov-Tyan-Shanskii P. P. The history of the half-century activities of the Russian Geographical Society (1845–1895). St. Petersburg; 1896. Vol. 1. P. 1–22. (In Russ.)

Skrydlov A. Yu. The statistician and state power in the first half of the 19th century: on the biography of K. I. Arsenyev (1789–1865). *Genesis: istoricheskie issledovaniya = Genesis: Historical Research*. 2020;11:37–47. (In Russ.). doi: 10.25136/2409-868X.2020.11.34470

The grave of K. I. Arsenyev, a geographer and statistician. *Ob"ekty istoriko-kul'turnogo naslediya goroda Petrozavodska = Objects of historical and cultural heritage of the city of Petrozavodsk*. Republican Centre for State Protection of Cultural Heritage Objects. Petrozavodsk; 2013. P. 92. (In Russ.)

Tishkov A. A. A brief history of academic geography in Russia: stages, achievements, and people. Moscow: Geos; 2024. 215 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 16.04.2026; принята к публикации / accepted: 17.04.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филатов Николай Николаевич

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, профессор,
главный научный сотрудник

e-mail: nfilatov@rambler.ru

Васильева Анастасия Владимировна

канд. экон. наук, старший научный сотрудник
лаборатории комплексного изучения Арктики

e-mail: vasnask@gmail.com

Июдина Ярослава Кирилловна

графический дизайнер

e-mail: ya.roganina@yandex.ru

Кузнецов Денис Николаевич

ученый секретарь

e-mail: dnkuz@yandex.ru

Регеранд Татьяна Ивановна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник,
заместитель директора по научно-организационной
работе

e-mail: regerand@mail.ru

Собисевич Алексей Владимирович

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: sobisevich@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Filatov, Nikolai

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,
Chief Researcher

Vasilieva, Anastasiia

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Iudina, Yaroslava

Graphic designer

Kuznetsov, Denis

Secretary for Science

Regerand, Tatyana

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher,
Deputy Director for Research Administration

Sobisevich, Aleksei

Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher

ЗИМНЯЯ ЛИМНОЛОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА-ПРАКТИКА – 2026



ОБЪЕДИНЕННАЯ ДИРЕКЦИЯ
ЗАПОВЕДНИКА «КОСТОМУКШСКИЙ»
И НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «КАЛЕВАЛЬСКИЙ»



5–10 апреля 2026 года в г. Костомукше состоялось ежегодное научно-образовательное мероприятие «Зимняя лимнологическая школа-практика», включенное в план работы Карельского отделения Русского географического общества на 2026 год. Его организовали и провели Институт водных проблем Севера ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ИВПС КарНЦ РАН), ФГБУ «Объединенная дирекция государственного природного заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» и Государственное автономное учреждение дополнительного профессионального образования Республики Карелия «Карельский институт развития образования» (КИРО).

Зимняя лимнологическая школа-практика – это традиционное мероприятие ИВПС КарНЦ РАН, начало которому было положено в 2006 году при тесном сотрудничестве с Университетом Хельсинки. В ИВПС эта работа велась по Программе Президиума РАН «Поддержка молодых ученых» раздела «Поддержка деятельности институтов РАН по привлечению талантливой молодежи к научной работе».

Многие годы оно проходило на базе биологической станции «Ламми» (Финляндия). В 2021 году принимающей стороной Зимней лимнологической школы-практики выступил Институт проблем промышленной экологии

Севера (ИППЭС) Кольского научного центра РАН, и мероприятие под названием Полярная школа-практика переместилось на берег озера Имандра, крупнейшего водоема Мурманской области в 20 км от г. Апатиты. В 2025 году проведение школы было организовано в Карелии, на территории Костомукшского заповедника, при поддержке проверенных партнеров. Мероприятие оказалось плодотворным, понравилось и запомнилось.

И вот 5 апреля 2026 г. в Костомукше вновь собрались учителя из различных районов Республики Карелия, студенты из Москвы, магистранты из Санкт-Петербурга, школьники, преподаватели, в том числе МГИМО МИД (г. Москва), а также сотрудники ООПТ для участия в Зимней лимнологической школе-практике – 2026. Мероприятие открылось 6 апреля. От лица организаторов школы участников традиционно приветствовали заместитель директора ИВПС КарНЦ РАН по научно-организационной работе Т. И. Регеранд и директор государственного природного заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» С. В. Тархов.

Программа школы-практики тщательно готовилась с учетом погодных условий и состава участников. Основная цель научно-образовательного мероприятия – создание, закрепление





и совершенствование навыков проведения полевых исследований в разных дисциплинах изучения водных объектов. Ставились и выполнялись задачи освоения участниками различных методик отбора гидрохимических и гидробиологических проб при выполнении гидрофизических измерений, разбора проб в лабораторных условиях, анализа данных и представления полученных результатов.

Как и в прошлом году, сотрудники заповедника под руководством заместителя директора по научной работе Е. В. Кузнецовой позаботились о размещении и бытовых условиях участников, предоставили необходимое оборудование и помещения для процесса обучения, провели инструктаж по технике безопасности и познакомили гостей с научной деятельностью заповедника, визит-центром, историей создания заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» и перспективой их развития.

Подробная вводная информация о территории исследований – Костомукшском заповеднике – прозвучала в теоретических лекциях (организованных в дистанционном режиме) ведущих специалистов в области геологии и гидрохимии: «Геологические и геоморфологические особенности территории заповедника «Костомукшский» (к. г. н. Шелехова Т. С.), «Гидрохимические особенности водных объектов Северной Карелии и качество их воды» (к. х. н. Галахина Н. Е.), с особым акцентом на сезон проведения мероприятия – в онлайн-лекции «Исследования водных объектов в зимний период» (к. г. н. Толстиков А. В.).

Исследовательскую часть работы мероприятия, как и ранее, взяли на себя активные молодые ученые ИВПС. Учитывая меняющиеся погодные условия, показательная полевая практика под руководством С. М. Сидорова проводилась в первый день на льду литоральной зоны оз. Контоккиярви и включала в себя отбор проб воды, донных отложений на гидрохимический и гидробиологический анализ, измерения температуры воды. Отдельно для микробиологических исследований были отобраны пробы в реке Контокки и в канале сточных ливневых вод. Затем научные сотрудники А. И. Сидорова, И. В. Морозова и Е. М. Макарова ознакомили участников с методами обработки гидрохимических и гидробиологических проб, а также проб донных отложений, научили делать посевы для выявления условно-патогенных микроорганизмов.

Во второй день работы Зимней лимнологической школы полевая практика состоялась на реке Контокки и канале ливневого стока.

Сразу после отбора проб участники слушали лекции сотрудников ИВПС, представленные в качестве примера возможных исследований: «Методы полевых исследований водоемов» (Сидоров С. М.), «Особенности распределения метана в воде и донных отложениях Онежского озера» (Морозова И. В.), «Биологический мониторинг водных объектов: биоиндикация и биотестирование» (к. б. н. Макарова Е. М.), «Современное состояние фитопланктона Кижских шхер Онежского озера» (Сластина Ю. Л., Смирнова В. С.), «Зоопланктон» (к. б. н. Сидорова А. И., к. б. н. Фомина Ю. Ю., к. б. н. Сярки М. Т.), «Биологическое загрязнение», «Макрозообентос как индикатор состояния водных объектов» (к. б. н. Сидорова А. И.).

Всю вторую половину дня участники школы-практики под руководством А. И. Сидоровой и И. В. Морозовой разбирали пробы макрозообентоса и выполняли химический анализ воды и донных отложений. В лаборатории микробиологии под руководством Е. М. Макаровой вели учет полученных через сутки результатов первого дня: выполняли цитохром-оксидазный тест для определения общих колIFORMных бактерий и окрас по Граму для выявления сульфитредуцирующих бактерий, подсчитывали общее микробное число.

На третий день мероприятия Е. В. Кузнецова провела экскурсию по визит-центру заповедника, на которой участники могли предложить идеи для создания новой экологической тропы. Елена Вячеславовна рассказала о флоре и фауне Северной Карелии, жизни и быте карелов.

Затем под руководством Е. М. Макаровой состоялся большой практикум по токсикологии с использованием стандартного тест-объекта *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg, 1900. После лекции об устойчивости к влиянию токсикантов живых организмов и определении показателей резистентности по кривой «доза-эффект» участники ставили опыт для определения смертельной для 50 % особей (CL_{50}) концентрации нитрата калия по кривой «доза-эффект». Далее определяли токсичность речных и ливневых вод в острых опытах.

Один из дней работы школы-практики традиционно посвящался озеру Каменному. Сложный маршрут экспресс-экспедиции совмещал отбор проб и поход по «Тропе корабейников». Е. В. Кузнецова провела уникальную экскурсию с показом как природных, так и исторических экспонатов. Отобранные на оз. Каменном пробы в тот же день по возвращении в визит-центр были разобраны и проанализированы участниками мероприятия.

Вечером началась подготовка к отчетам по выбранным направлениям: химические показатели воды и донных отложений, условно-патогенные микроорганизмы и биотестирование, макрозообентос.

Утром заключительного дня итоговые презентации были успешно завершены и представлены на конференции заповедника «Костомукшский», на которой состоялось вручение сертификатов, а преподаватели средних школ получили удостоверения о повышении квалификации от КИРО.

Во второй половине дня Е. М. Макарова прочитала лекцию «Онежское озеро в условиях изменения климата и влияния антропогенного фактора», а результаты гидрохимических, микробиологических и гидробиологических исследований, полученных в рамках школы, были продемонстрированы жителям города. Кроме того, в рамках работы Зимней лимнологической школы-практики А. И. Сидорова провела занятие «Жизнь на дне озера» для участников «Движения Первых» из школы № 1 и Пушкинской школы г. Костомукши –

представителей клуба «Юннаты», заинтересованных в изучении окружающей среды и ее охране, а также для подростков из Центра помощи детям, оставшимся без попечения родителей, № 1 г. Костомукши.

О работе школы-практики Т. И. Регеранд и Е. В. Кузнецова рассказали в прямом эфире Костомукшского радио.

Зимняя лимнологическая школа-практика – 2026 завершилась 10 апреля. Программа была насыщена событиями разного формата: наука, образование и даже походы с исследовательскими целями, объединившие участников. Всего за неделю работы на занятиях научных сотрудников ИВПС КарНЦ РАН побывало около 100 человек, от младших школьников до активных пенсионеров, включая непосредственных участников школы и сотрудников заповедника «Костомукшский».

*А. И. Сидорова, Е. М. Макарова,
Е. В. Кузнецова, Т. И. Регеранд,
С. М. Сидоров, И. В. Морозова*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, утраты науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил её оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются электронная версия статьи, которую авторы вычитывают и заверяют.

Журнал имеет систему электронной редакции на базе Open Journal System (OJS), позволяющую вести представление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронном формате и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Содержание выпусков Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные версии статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word в систему электронной редакции на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо высылаются на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

Для публикации в выпусках серии «Математическое моделирование и информационные технологии» рукописи принимаются в формате .tex (LaTeX 2ε) с использованием стилевого файла, который находится по адресу <http://transactions.krc.karelia.ru/section.php?id=755>.

Обязательные элементы рукописи располагаются в следующем порядке:

УДК курсивом в левом верхнем углу первой страницы; заглавие статьи на русском языке полужирным шрифтом; инициалы и фамилии авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название и полный почтовый адрес организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов аффилированным организациям; следует отметить звездочкой автора, ответственного за переписку, и указать в аффилиации его электронный адрес); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; указание источников финансирования выполненных исследований на русском языке.

Далее располагаются все вышеуказанные элементы на английском языке.

Текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности; списки литературы на языке оригинала (**Литература**) и на английском языке (**References**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; можно указать телефон для контакта редакции с авторами статьи.

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать ее содержание и состоять из 8–10 значащих слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (как правило, не менее пяти). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце точка не ставится.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. На табличный и иллюстративный материал следует ссылаться так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т.д.), фотографии, помещаемые на наклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо первым словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации.

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы могут быть снабжены указанием желательного размера рисунка, пожеланиями и требованиями к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Карты желательна приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с картой более мелкого масштаба, где обозначен представленный на основной карте участок.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточную информацию для того, чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. Названия таксонов рода и вида даются курсивом. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желателно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicus* (Gmelin, 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все прочие сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. Располагаются после основного текста статьи отдельным абзацем, в котором авторы выражают признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и организациям, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ. При подаче статьи авторы должны раскрыть потенциальные конфликты интересов, которые могут быть восприняты как оказавшие влияние на результаты или выводы, представленные в работе. Если конфликт интересов отсутствует, следует об этом сообщить в отдельной формулировке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Источники располагаются в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами авторов ставится пробел.

REFERENCES. Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические записи источников оформляются согласно стилю Vancouver (см. примеры в ГОСТ Р 7.0.7-2021 и образцы ниже) и располагаются в алфавитном порядке. Заголовки русскоязычных работ приводятся на английском языке; для журналов и сборников, в которых размещены цитируемые работы, указывается параллельное английское наименование (при его наличии) либо русскоязычное наименование приводится в латинской транслитерации (вариант BSI) с переводом на английский язык. Прочие элементы библиографической записи приводятся на английском языке (русскоязычное название издательства транслитерируется). При наличии переводной версии источника в References желателно указать ее. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Для каждого источника обязательно указание DOI при его наличии; если приводится адрес интернет-страницы источника (URL), нужно указать дату обращения к ней.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 577.125.8

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАБОЛИТОВ ОКСИДА АЗОТА В КРОВИ ЗДОРОВЫХ ЛЮДЕЙ И ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗНЫЕ АЛЛЕЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ГЕНОВ ACE (RS4340) И CYP11B2 (RS1799998)

Л. В. Топчиева^{1*}, О. В. Балан¹, В. А. Корнева², И. Е. Малышева¹

¹Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *topchieva@ya.ru

²Петрозаводский государственный университет (просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: артериальная гипертензия; оксид азота; индуцибельная синтаза оксида азота; ангиотензинпревращающий фермент; инсерционно-делеционный полиморфизм гена ACE; альдостеронсинтаза; ген CYP11B2

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0218-2019-0077).

L. V. Topchieva^{1*}, O. V. Balan¹, V. A. Korneva², I. E. Malysheva¹. THE NITRIC OXIDE LEVEL IN THE BLOOD OF HEALTHY PEOPLE AND PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION CARRYING DIFFERENT ALLELE VARIANTS OF THE ACE (RS4340) AND CYP11B2 (RS1799998) GENES

¹Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *topchieva@ya.ru

²Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

Аннотация на английском языке

Keywords: arterial hypertension; nitric oxide; inducible nitric oxide synthase; angiotensin-converting enzyme; insertion-deletion polymorphism of ACE genes; aldosterone synthase; CYP11B2 gene

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (0218-2019-0077).

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм ² Chloroplast cross-sectional area, μm ²	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм ² Mitochondria cross-sectional area, μm ²	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм ² Peroxisome cross-sectional area, μm ²	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // Entomologica Fennica. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

References:

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews*. 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

Литература:

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)*. Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Литература:

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

Литература:

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

References:

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

Литература:

Гребенщикова Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

References:

Grebenshchikova Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

Ссылки на интернет-ресурсы

Литература:

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
No. 4, 2026
LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

- A. A. Konik, A. V. Isaev, A. V. Zimin. ESTIMATION OF THE ACCURACY OF THE MODIS/AQUA AND MODIS/TERRA SATELLITE TEMPERATURES FOR LAKE LADOGA DURING THE WARM SEASON 5

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

- T. A. Koroleva, E. A. Vakhrameeva, R. D. Korobitsyna. RECONNAISSANCE STUDIES OF ORGANO-HALIDES IN LAKES OF THE ARKHANGELSK AND MURMANSK REGIONS 14

- E. S. Kolpakova, A. V. Velyamidova. ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN SMALL LAKE ECOSYSTEMS OF THE WHITE SEA BASIN (KANDALAKSHA BAY) 25

- P. N. Adamskaia, Z. I. Slukovskii, V. A. Dauvalter, I. V. Chikirev. LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF MODERN SEDIMENTS IN LAKES OF THE RYBACHY AND SREDNY PENINSULAS (MURMANSK REGION, ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION) 33

- G. S. Borodulina, I. V. Tokarev, P. V. Medvedev, V. A. Shekov. FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER IN WATER BODIES OCCUPYING QUARRIES IN THE RUSKEALA MINING PARK (KARELIA) 49

- V. S. Valiev, D. V. Ivanov, A. B. Alexandrova, I. I. Ziganshin, R. R. Khasanov. A TWO-LOOP MODEL FOR THE FORMATION AND PREDICTION OF REDOX CONDITIONS IN LAKES 64

HYDROBIOLOGY

- E. S. Savosin, D. S. Savosin. MACROZOOBENTHOS OF MOLOCHNAYA BAY (LAKE IMANDRA) WITH COMMERCIAL TROUT FARMING 79

- P. R. Makarevich. DIATOM MICROPHYTOBENTHOS OF GRØNFJORD BAY (WEST SPITSBERGEN) DURING THE POLAR NIGHT 89

RESEARCH METHODS

- E. A. Morozov, D. V. Pozdnyakov. MULTIYEAR TRENDS IN PHYTOPLANKTON GROWTH IN THE WHITE SEA SURFACE WATERS: A SATELLITE STUDY ACROSS 2003–2020 98

- A. S. Nartov, M. A. Lavrukhina. ASSESSMENT OF HYDROCHEMICAL INDICATORS OF THE RYBINSK RESERVOIR USING THE EQUIVALENT LEVEL METHOD 111

HISTORY OF SCIENCE

N. N. Filatov, A. V. Vasilyeva, Y. K. Iudina, D. N. Kuznetsov, T. I. Regerand, A. V. Sobisevich.
AN UNFORGOTTEN GEOGRAPHER, STATISTICIAN, ECONOMIST, HISTORIAN, AND ACADEMI-
CIAN – K. I. ARSENYEV 125

CHRONICLE

A. I. Sidorova, E. M. Makarova, E. V. Kuznetsova, T. I. Regerand, S. M. Sidorov, I. V. Morozova.
Winter Limnological School and Workshop 2026 138

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 143

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 4, 2026

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 12 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Л. Э. Бюркланд

Подписано в печать 23.04.2026. Дата выхода 30.04.2026. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 17,0. Усл. печ. л. 17,5.
Тираж 100 экз. Заказ 893. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185030, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50