

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 9, 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. г.-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. (Франция); Е. А. КУРАШОВ, д. б. н., проф.; М. А. НАУМЕНКО, д. г. н., проф.; И. Ш. НОРМАТОВ, член-корр. НАН Таджикистана, д. х. н., проф. (Таджикистан); 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. 9, 2026

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY

Petrozavodsk
2026

Editor-in-Chief

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

Editorial Committee

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 (Geol.-Miner.); 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. SUKHOVILLO, PhD (Geog.) (Republic of Belarus); X. LI, PhD (Geol.-Miner.) (China); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the «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.) (France); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.), Prof.; M. A. NAUMENKO, DSc (Geog.), Prof.; I. Sh. NORMATOV, NANT Corr. Fellow, DSc (Chem.), Prof. (Tadjikistan); 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>

© Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2026
© Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences, 2026

УДК 556.555,556.555.4

РАВНОВЕСНЫЕ ПРОФИЛИ ПЛОТНОСТИ И ГЛУБИНА ТЕРМОКЛИНА В ОЗЕРАХ В ПЕРИОД ЛЕТНЕЙ СТРАТИФИКАЦИИ

С. Р. Богданов

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. Александра Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030)*

С использованием методов вариационного исчисления произведен расчет асимптотических профилей плотности, характеризующих равновесное состояние водной толщи озера после прекращения внешнего воздействия. В качестве определяющих параметров использованы потенциальная энергия и средняя по столбу плотность. В аналитическом виде получены два семейства профилей, представляющих два типа распределения плотности, ассоциируемых соответственно с двухслойной структурой водной толщи и возникновением перемешанного слоя. Рассчитаны также пороговые значения определяющих параметров, соответствующие изменению типа распределения. Верификация результатов расчета осуществлена для трех озер путем сравнения модельных профилей с экспериментальными данными, полученными с высоким вертикальным разрешением на пике летней стратификации. Для всех трех озер коэффициенты корреляции расчетных и экспериментальных рядов превышали значение 0,98. С использованием рассчитанных аналитических профилей разработан и апробирован новый алгоритм расчета глубины термоклина. Обсуждены варианты и возможности использования полученных результатов для количественного описания процессов турбулентного перемешивания.

Ключевые слова: вертикальные профили плотности; функция распределения объема по плотности; вариационное исчисление; энтропия; глубина термоклина

Для цитирования: Богданов С. Р. Равновесные профили плотности и глубина термоклина в озерах в период летней стратификации // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 5–17. doi: 10.17076/lim2322

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН «Функционирование экосистемы Онежского озера и озерно-речных систем его водосборной территории в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия» (FMEN-2026-0011).

S. R. Bogdanov. EQUILIBRIUM DENSITY PROFILES AND THERMOCLINE DEPTH IN LAKES DURING THE PERIOD OF SUMMER STRATIFICATION

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

Using variational calculus methods, asymptotic density profiles were produced, characterizing the equilibrium state of the lake water column attained after the cessation

of external forcing. Potential energy and column-averaged density were used as the governing parameters. Two analytical-form profile families were obtained, representing two types of density distributions associated, respectively, with the two-layer structure of the water column and the appearance of a mixed layer. The threshold values of the governing parameters corresponding to changes in the type of distribution were also calculated. Verification of the results was carried out for three lakes by comparing the modeled profiles with high vertical resolution experimental data collected at the peak of summer stratification. The correlation coefficients exceeded 0.98 for all the three lakes. Using the calculated analytical profiles, a new algorithm for deriving the thermocline depth was developed and tested. Options and possibilities of using the results for quantitative description of turbulent mixing processes are discussed.

Keywords: vertical density profiles; volume density distribution function; calculus of variations; entropy; thermocline depth

For citation: Bogdanov S. R. Equilibrium density profiles and thermocline depth in lakes during the period of summer stratification. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 5–17. doi: 10.17076/lim2322

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS “Functioning of the ecosystem of Lake Onego and lake-river systems of its catchment area under climate change and anthropogenic impact” (FMEN-2026-0011).

Введение. Постановка задачи. Обзор литературы

Озера представляют собой весьма чувствительный индикатор как климатических изменений, так и антропогенных воздействий [Pilla et al., 2021]. При этом характер этих изменений обычно отслеживается на основе мониторинга параметров эпилимниона, в первую очередь – температуры поверхностного слоя и его толщины. В гораздо меньшей степени, даже в рамках 1D-моделей [Kraus, Turner, 1967; Sundaram, Rehm, 1973], изучены тренды и отклики параметров, характеризующих глубинные слои или термическую структуру водного столба в целом. При этом характер указанных откликов далеко не всегда согласуется с тенденциями, обнаруживаемыми, например, при долговременном мониторинге поверхностной температуры, а соответствующие тренды могут существенно отличаться не только по величине, но даже по направлению [Pilla et al., 2020a, 2021].

Таким образом, для адекватной и комплексной оценки отклика системы на долгосрочные вариации внешних воздействий необходимо использовать более полную метрику термической структуры, которая включает не только характеристики поверхностного слоя. При этом обычно полнота этой метрики подразумевает описание профилей температуры и плотности с помощью большого числа морфологических параметров, характеризующих как границы различных слоев водного столба

(перемешанного слоя, термоклина, придонного слоя), так и характер и степень их стратификации. В этой связи подобные метрики могут включать значительное число параметров (см., например, [Naumenko, Guzivaty, 2023]); при этом в последних исследованиях особое внимание, как отмечено выше, уделяется характеристикам глубинных слоев. Альтернативный вариант комплексной оценки отклика системы – изучение профиля в целом.

Еще один важный тренд в изучении параметров термической структуры (особенно в контексте проблем ее изменений в результате турбулентного перемешивания) основан на использовании энергетических характеристик. В качестве примера можно привести работу [Reichl et al., 2022], где с использованием концепции аномальной потенциальной энергии (рассматриваемой как инструмент оценки «энергетической удаленности» данной термической структуры от состояния полного перемешивания) предложен метод оценки такого важнейшего параметра, как глубина перемешанного слоя. В рамках этого же направления весьма плодотворной оказалась идея использования виртуальных профилей, характеризующих некоторые асимптотические или гипотетические состояния. Так, при изучении эффективности перемешивания часто используется так называемая базовая потенциальная энергия, соответствующая энергии гидростатически устойчивого профиля, получаемого в результате адиабатической пересортировки слоев

столба жидкости в монотонном по плотности порядке [Winters et al., 1995].

В работах [Tabak, Tal, 2004; Venaille et al., 2017] предприняты попытки построения «равновесных» профилей температуры и плотности, основанные на использовании базовых принципов статистической физики, а также динамических инвариантов (включая энергию) в невязком пределе. При этом в рамках специальных предположений о тонкой структуре поля плотности осуществлен расчет числа микросостояний, соответствующих заданному макросостоянию (coarse-grained field), определяемому по результатам локального усреднения. На этой основе, в свою очередь, идентифицированы равновесные состояния водного столба, характеризующиеся гладкими устойчивыми профилями усредненной плотности. Такие состояния, достигаемые в рамках адиабатической динамики, трактуются как асимптотические и ассоциируются с аттракторами, как это принято в нелинейной динамике.

В данной работе представлена попытка построения равновесного гидростатически устойчивого профиля, основанная на использовании принципов вариационного исчисления, когда из множества допустимых по энергетическим показателям профилей выбирается в качестве асимптотически реализуемого тот, которому соответствует максимальная энтропия.

Методы

Постановка вариационной задачи

В рамках предлагаемого метода не рассматривается динамика системы и процессы перехода из одного равновесного состояния в другое. Основная задача заключается в отыскании вертикальных профилей плотности ρ в состояниях равновесия, достигаемых через некоторое время после прекращения внешнего воздействия. Соответствующий метод основан, как и в работах [Tabak, Tal, 2004; Venaille et al., 2017], на рассмотрении гипотетических равновесных состояний водной толщи, которые достигаются после завершения релаксационных процессов. Предполагается, что эти воздействия (mixing event), происходящие в течение ограниченного по времени интервала, порождают неустойчивость системы и приводят к перемешиванию водного столба. При этом следует иметь в виду, что соответствующие релаксационные процессы (обусловленные, в частности, затуханием турбулентности и турбулентного теплообмена) могут протекать в течение достаточно длительных промежутков времени.

В этой связи указанные равновесные состояния следует рассматривать как некоторую идеализацию, или асимптотические состояния, к которым стремится система. В реальных ситуациях такие состояния редко полностью достигаются, особенно в условиях переменных во времени внешних воздействий. Однако, как будет показано ниже, параметры равновесных состояний могут нести полезную информацию как о текущей термической структуре озера, так и о некоторых тенденциях ее трансформации.

В рамках простейшего (1D) приближения, которое используется в дальнейшем, принимается, что величина ρ зависит лишь от вертикальной координаты z , а функция $\rho(z)$ монотонно изменяется с глубиной, что соответствует гидростатической устойчивости. Состояние водного столба в положении равновесия в рамках указанного приближения можно также альтернативно описывать с помощью функции распределения $f(\rho)$ водной толщи по значениям плотности, с помощью которой доля того объема жидкости, плотность которого заключена в интервале $[\rho, \rho + \Delta\rho]$, вычисляется как $f(\rho)d\rho$. В рамках 1D-подхода функции $f(\rho)$ и $\rho(z)$ непосредственно связаны следующим соотношением:

$$f(\rho)d\rho = -dz/H, \quad (1)$$

где H – глубина. Плотность варьируется в диапазоне $[\rho_s, \rho_b]$, от минимального ρ_s на поверхности (surface) до максимального ρ_b у дна (bottom). Для определенности используется ось z , направленная вверх; $z = 0$ соответствует дну: $\rho(0) = \rho_b$, $\rho(H) = \rho_s$.

Следует при этом отметить, что функция распределения по плотности является источником наиболее прямых параметров, характеризующих перемешивание [Wykes et al., 2015]. Таким параметром может служить, например, дисперсия распределения $f(\rho)$. Еще один важный параметр, связанный с функцией $f(\rho)$, – энтропия $S = \int_{\rho_s}^{\rho_b} f \ln f d\rho$. В общем случае величину S можно рассматривать как меру неупорядоченности рассматриваемого распределения. При этом энтропия достигает максимума для такого распределения, которое при заданных физических ограничениях является наименее упорядоченным и структурированным и, соответственно, наиболее вероятным.

С другой стороны, каждая функция $f(\rho)$ однозначно связана с каким-то монотонным профилем плотности. При этом искомые равновесные профили можно рассматривать как характеристики равновесных состояний среды, достигаемых после завершения релаксационных процессов, вызванных внешним воздействием.

Поскольку эти самопроизвольно протекающие процессы связаны в основном с турбулентным перемешиванием и, соответственно, сглаживанием структурных различий, указанные состояния можно рассматривать и как наиболее вероятные, и как наименее упорядоченные и структурированные (в рамках имеющихся энергетических ограничений). В этой связи можно предположить, что искомые профили соответствуют состояниям с максимальной энтропией.

Таким образом, существо метода будет заключаться в идентификации равновесных («секкулярных») профилей $\rho(z)$ на основе использования принципа максимальной энтропии S . При этом ключевую роль в такой идентификации играет учет физических ограничений и соответствующих им «управляющих параметров».

В данной работе в качестве таких параметров принимаются величины $m = \int_0^H \rho dz$ (кг/м²) и $E_p = g \int_0^H \rho z dz$ (Дж/м²), которые численно равны, соответственно, массе и потенциальной энергии единичного по площади столба жидкости.

Вывод уравнения для равновесной функции распределения

С технической точки зрения отыскание функций $f(\rho)$ сводится к стандартной задаче вариационного исчисления: требуется найти максимум функционала $S = \int_{\rho_s}^{\rho_b} f \ln f d\rho$ при двух заданных ограничениях, которые, с учетом соотношения (1), можно представить в виде:

$$m = H \int_{\rho_s}^{\rho_b} \rho f d\rho; \quad E_p = gH \int_{\rho_s}^{\rho_b} \rho z f d\rho. \quad (2)$$

Указанную задачу удобно сформулировать с помощью кумулятивной функции распределения F , связанной с функцией f соотношением: $dF = f(\rho) d\rho$. При этом с учетом граничных условий $F(\rho_s) = 0$; $F(\rho_b) = 1$ для массы m после интегрирования первого из выражений (2) по частям получаем представление:

$$m = \rho_b H - H \int_{\rho_s}^{\rho_b} F d\rho. \quad (3)$$

С использованием соотношения (1) величину z , в свою очередь, можно выразить через F :

$$z = -H \int_{\rho_b}^{\rho} f d\rho = -H(F - 1). \quad (4)$$

С использованием последнего выражения величину потенциальной энергии после преобразования второго выражения (2) можно записать в виде (аналогичное выражение для потенциальной энергии через функцию распределения плотности представлено в [Wykes et al., 2015]):

$$E_p = (gH^2/2) \left(\rho_b + \int_{\rho_s}^{\rho_b} (F^2 - 2F) d\rho \right). \quad (5)$$

В результате для указанной задачи на условный экстремум получаем следующую функцию Лагранжа L :

$$L = \frac{dF}{d\rho} \ln \left(\frac{dF}{d\rho} \right) + \frac{\lambda_2}{2} (F^2 - F) - \lambda_2 F. \quad (6)$$

Здесь λ_2 и λ_3 – множители Лагранжа, которые подлежат определению из формул (3) и (5) по заданным значениям массы и потенциальной энергии. При определении физически возможного диапазона значений m и E_p следует принять во внимание, что при заданных значениях ρ_b и ρ_s плотности у дна и на поверхности величина m может изменяться в диапазоне $[\rho_s H, \rho_b H]$. Физически возможные значения E_p также ограничены; варьируются в промежутке $[g\rho_b z^{*2}/2 + g\rho_s (H^2 - z^{*2})/2, mgH/2]$, где $z^* = (m - \rho_s H)/(\rho_b - \rho_s)$.

Используя представление (6) для функции Лагранжа рассматриваемой вариационной задачи, уравнение Эйлера для функции $F(\rho)$ можно записать в виде: $\frac{d^2 F}{d\rho^2} = (\lambda_2 F - \lambda_3) \frac{dF}{d\rho}$.

После интегрирования получаем уравнение первого порядка:

$$dF/d\rho = (\lambda_2 F^2/2 - \lambda_3 F + A), \quad (7)$$

где A – константа интегрирования.

Функция F по определению монотонная, $dF/d\rho \geq 0$; соответственно, правая часть уравнения (7) также должна быть неотрицательной. Это условие выполняется при выполнении следующего ограничения на константы λ_2, λ_3 и A :

$$A \geq \lambda_3^2/(2\lambda_2). \quad (8)$$

Результаты

Равновесные профили и функции распределения. Анализ особенностей

Уравнение (7) имеет аналитическое решение, вид которого зависит от знака параметра λ_2 . Таким образом, получаем два семейства 4-параметрических модельных профилей. А именно, при условии $\lambda_2 > 0$ параметр A в формуле (7), в соответствии с представлением (8), также будет положительным, и функция F имеет вид:

$$F(\rho) = B_1 (\tan(C_1 \rho + C_2) - \tan(C_1 \rho_s + C_2)),$$

где $B_1 = (\tan(C_1 \rho_b + C_2) - \tan(C_1 \rho_s + C_2))^{-1}$

Соответственно, для профиля плотности с учетом соотношения (4) получаем следующее аналитическое представление в виде обратной функции $z(\rho)$:

$$z = HB_1 (\tan(C_1 \rho_b + C_2) - (\tan(C_1 \rho + C_2))). \quad (9)$$

Константы C_1 и C_2 определяются по заданным значениям E_p и m из решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{m}{H} + \rho_b + B_1(\rho_b - \rho_s)(\tan(C_1 \rho_b + C_2) - \frac{B_1}{2C_1} \ln \frac{1+\tan^2(C_1 \rho_b + C_2)}{1+\tan^2(C_1 \rho_s + C_2)}) &= 0 \\ -\frac{2E_p}{gH^2} + \rho_b + \frac{B_1}{C_1} + 2B_1\left(\frac{m}{H} - \rho_b\right) \tan(C_1 \rho_b + C_2) - (\rho_b - \rho_s)B_1^2(\tan^2(C_1 \rho_b + C_2) + 1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Чтобы исключить нефизичные профили с сингулярностями, константы C_1 и C_2 должны удовлетворять неравенствам:

$$C_1 < \frac{\pi}{\rho_b - \rho_s}; \quad -\frac{\pi}{2} - C_1 \rho_s < C_2 < \frac{\pi}{2} - C_1 \rho_b.$$

Результаты расчета семейства профилей (9) для разных значений энергии E_p приведены на рис. 1; для определенности представлен случай, когда для второго параметра использовалось значение $m = (\rho_s + \rho_b)H/2$. Для этого случая минимальное (двухслойная толща) и максимальное (полное перемешивание) значения E_p равны соответственно $E_{p,min} = gH^2(\rho_b + 3\rho_s)/8$ и $E_{p,max} = gH^2(\rho_b + \rho_s)/4$. При этом расчеты показали, что профилям вида (9) соответствуют значения потенциальной энергии в диапазоне от $E_{p,min}$ до порогового значения $E_{p,lstr} = gH^2(\rho_b + 2\rho_s)/6$, соответствующего линейной стратификации.

Для наглядности все три «пороговых» профиля также приведены на рис. 1 в виде сплошных полупрозрачных линий. Для предельных значений плотности использованы условные значения $\rho_s = 1000$ кг/м³ и $\rho_b = 1003$ кг/м³, разность которых соответствует характерным значениям $\rho_b - \rho_s$ в период летней стратификации.

Для профилей, описываемых семейством (9), характерно присутствие термоклина, степень размытости которого возрастает по мере приближения параметра энергии к пороговому значению $E_{p,lstr}$. Если при определении термоклина использовать условие максимальности градиента dp/dz , то, с учетом аналитического представления (9), для значения плотности ρ^* на глубине термоклина нетрудно получить представление $\rho^* = -C_2/C_1$, которое задает в неявном виде зависимость значения величины ρ^* от массы и потенциальной энергии.

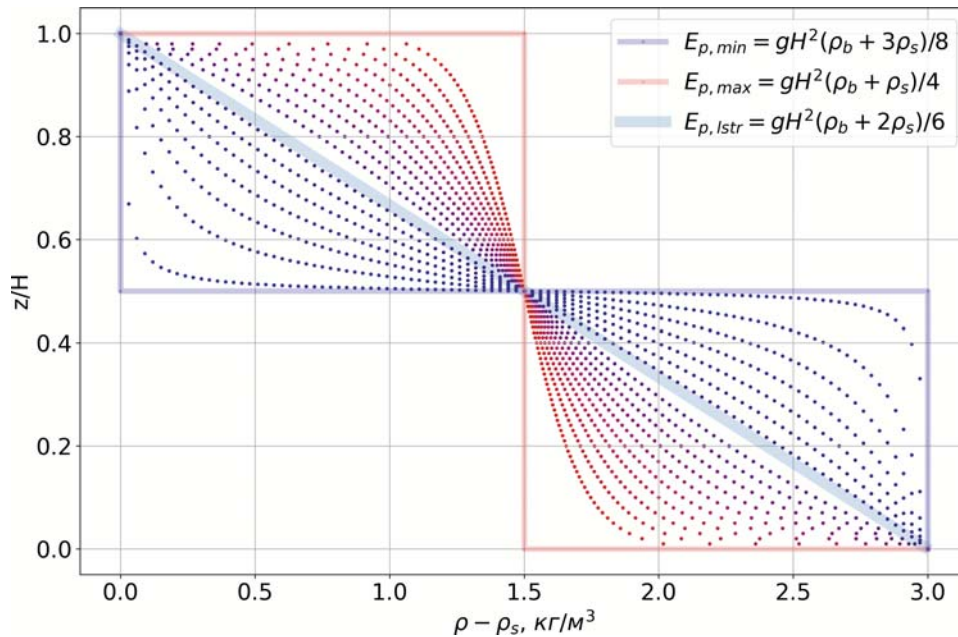


Рис. 1. Семейство профилей плотности для случая $\rho_s = 1000$, $\rho_b = 1003$, $m = (\rho_s + \rho_b)/2$ при монотонном увеличении энергии с шагом $gH^2(\rho_b - \rho_s)/160$. По мере увеличения энергии цвет линии изменяется от синего к красному. Полупрозрачные линии соответствуют состояниям водного столба с минимальным и максимальным значениями энергии E_p , а также случаю линейной стратификации

Fig. 1. A family of density profiles for the case $\rho_s = 1000$, $\rho_b = 1003$, $m = (\rho_s + \rho_b)/2$ with a monotonic increase in energy with a step of $gH^2(\rho_b - \rho_s)/160$. As energy increases, the line color changes from blue to red. The semi-transparent lines correspond to water column states with the minimum and maximum energy values E_p , as well as to the case of linear stratification

После отыскания величины ρ^* глубина z^* термоклина может быть непосредственно рассчитана по формуле (9). В отличие от традиционных методов, когда эта глубина определяется путем пошагового сравнения изменений плотности на соседних горизонтах, в описанном выше способе величина z^* вычисляется на основе предварительного расчета кумулятивных параметров, характеризующих водную толщу в целом.

Для случая $\lambda_2 < 0$ (что соответствует варьированию энергии в диапазоне $[E_{p,lstr}, E_{p,max}]$) решением уравнения (9) является равновесный профиль вида:

$$\frac{\rho - \rho_s}{\rho_b - \rho_s} = \left(\ln \frac{(a+1)(b-z)}{(b-1)(a+z)} \right) / \left(\ln \frac{(a+1)b}{(b-1)a} \right). \quad (11)$$

Константы a и b в данном случае также определяются по значениям массы и энергии, при этом нефизичные профили исключаются с использованием ограничений $a > 0$; $b > 1$. Для профилей, задаваемых соотношением (11), характерно наличие точки перегиба, появление которой можно рассматривать как признак формирования перемешанного слоя. При этом, однако, возникновение однородного слоя достигается лишь асимптотически, в пределе при $E_p \rightarrow E_{p,max}$. Соответствующее семейство профилей также приведено на рис. 1.

Сценарий эволюции профиля плотности, схематически представляемый рисунком 1, можно рассматривать как простейшую модель ветрового перемешивания, когда величины

ρ_s , ρ_b , m остаются неизменными, а потенциальная энергия изменяется от $E_{p,min}$ до $E_{p,max}$ на величину $\Delta E_p = gH^2(\rho_b - \rho_s)/8$. При использованных значениях ρ_s и ρ_b для озера глубиной 10 м это изменение потенциальной энергии составляет ~ 400 Дж/м². Для справки следует отметить, что конвертирование 100 Дж/м² ветровой энергии в потенциальную происходит, например, в случае, когда на водную поверхность воздействует ветер со скоростью 12 м/с в течение суток [Reichl et al., 2022].

С семейством профилей на рис. 1, представляющим модельную трансформацию профилей, с использованием формулы (1) можно сопоставить последовательность функций распределения, наглядно дополняющую картину перемешивания. Изменение функции распределения при изменении структуры от двухслойного состояния столба до состояния гомотермии представлено на рис. 2.

Форма равновесных профилей и вид функции распределения существенно зависят от значений параметров m и E_p . Так, например, следует отметить, что при $m \neq (\rho_s + \rho_b)/2$, согласно расчетам, возникновение линейной стратификации как промежуточного этапа процесса перемешивания возможно не во всей толще, а лишь в одном из слоев столба: приповерхностном, когда $m > (\rho_s + \rho_b)/2$, или придонном, когда $m < (\rho_s + \rho_b)/2$. Для иллюстрации на рис. 3 приведены семейства профилей

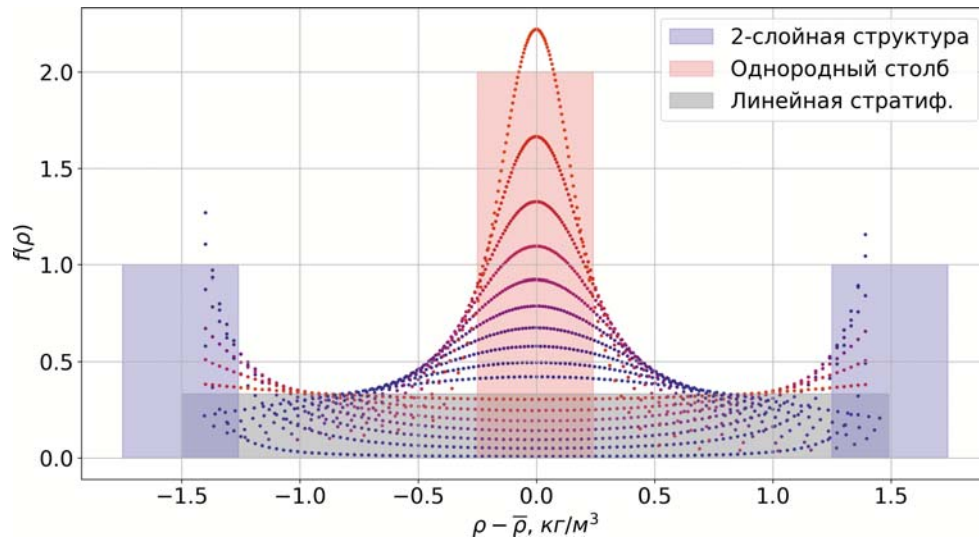


Рис. 2. Семейство функций распределения объема водной толщи по плотности, соответствующее семейству профилей на рис. 1. Полупрозрачные линии схематически представляют состояния с минимальной и максимальной энергией, а также случай линейной стратификации

Fig. 2. The family of water column distribution functions by density corresponding to the family of profiles in Fig. 1. The semi-transparent lines schematically represent states with the minimum and maximum energy values, as well as the case of linear stratification

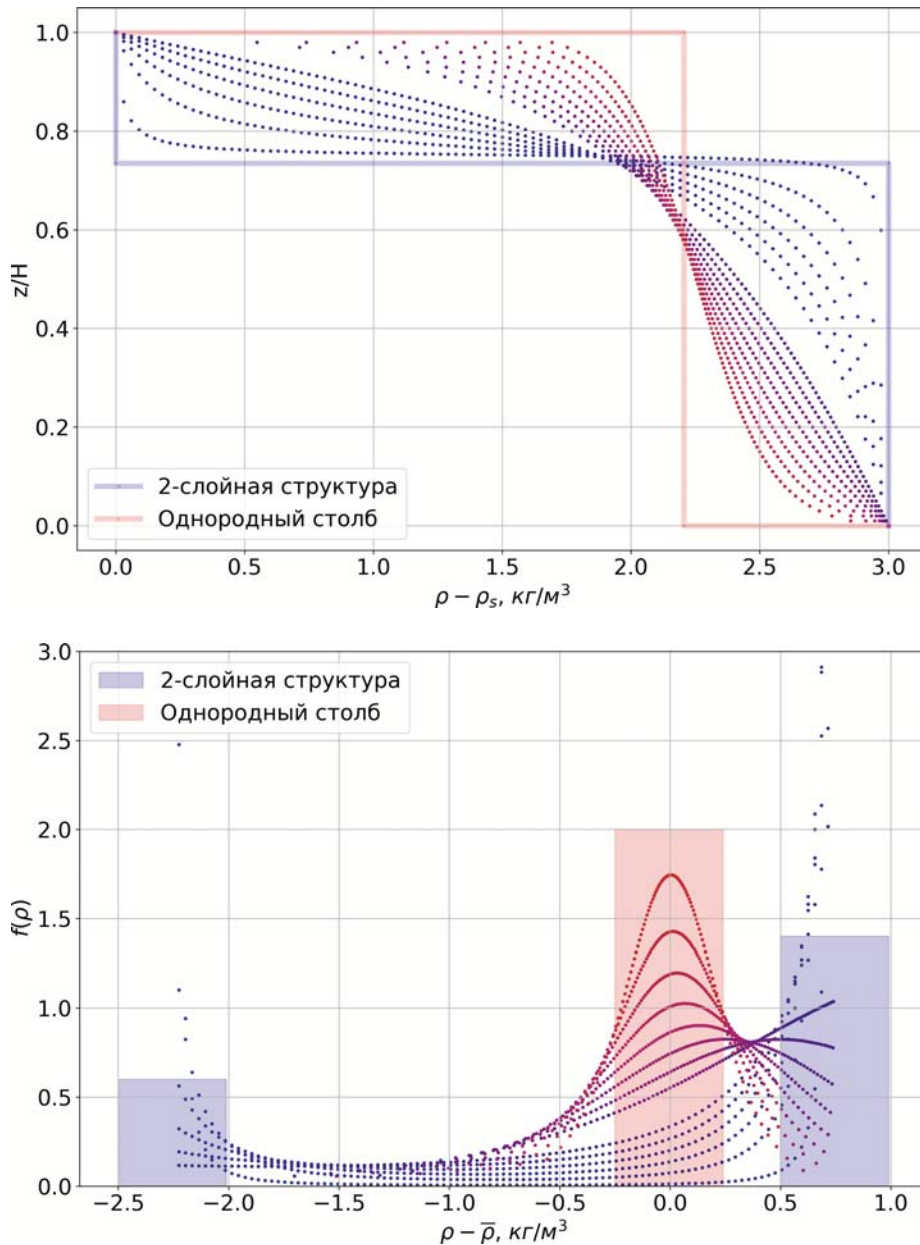


Рис. 3. Семейства профилей плотности (верхняя панель) и функции распределения $f(\rho)$ для случая $m = 0,75 H(\rho_s + \rho_b)$

Fig. 3. Families of density profiles (upper panel) and distribution functions $f(\rho)$ for case $m = 0,75 H(\rho_s + \rho_b)$

и функций распределения для случая, когда термоклин расположен на глубине $0,25 H$.

Следует также отметить, что оба семейства модельных профилей (9) и (11) включают четыре параметра (ρ_s , ρ_b , а также две константы, определяемые значениями m и E_p) и, строго говоря, не являются автомодельными. В частности, описание зависимости плотности от глубины по формуле (11) осуществляется с использованием двух дополнительных масштабов длины (определяемых по массе, глубине и

потенциальной энергии), связанных с константами a и b . В свою очередь, в случае формулы (9) также необходимо использовать, помимо ρ_s и ρ_b , два характерных калибровочных значения для плотности ρ , связанных с константами C_1 и C_2 . Одно из этих значений – значение ρ^* плотности на глубине термоклина, второе можно отождествить с величиной C_1^{-1} . Оба этих калибровочных значения рассчитываются из уравнений (10) по заданным значениям ρ_s , ρ_b , m , E_p .

*Верификация модельных профилей.
Сравнение с экспериментом.
Выбор объектов*

Как уже отмечалось, рассчитанные модельные профили описывают некоторые асимптотические состояния водного столба (возникающие как результат отклика системы на внешнее воздействие и адаптацию толщи), которые в реальных условиях редко достигаются из-за вариативности внешних воздействий и тепловой инерции системы. В этой связи при выборе объектов для апробации метода на первый взгляд может показаться, что наиболее подходящими являются мелководные озера, в силу их малой инерционности [Toffolon et al., 2022]. Однако это преимущество нивелируется вариативностью внешних воздействий и его большей значимостью именно в малых озерах (изменения потенциальной энергии, приводящие к существенной трансформации структуры профиля, пропорциональны H^2 , как было показано выше).

С другой стороны, если ограничиться рассмотрением семейства равновесных профилей (9), можно ожидать, что наиболее близкими к рассчитанным модельным профилям могут оказаться реальные профили, характерные для того короткого периода устойчивой летней стратификации, который соответствует, например, максимальному годовому теплосодержанию Q (предполагая, что именно в этот момент реализуется максимально устойчивое стратифицированное состояние).

В качестве альтернативного индикатора при выборе максимально устойчивой равновесной летней стратификации можно использовать так называемое относительное термическое сопротивление перемешиванию, RTR (Relative Thermal Resistance to Mixing) [Pilla et al., 2020b]. Этот широко используемый кумулятивный параметр вычисляется по формуле:

$$RTR = (\rho_b - \rho_s) / (\rho_{4^\circ C} - \rho_{5^\circ C}),$$

где $\rho_{4^\circ C}$ и $\rho_{5^\circ C}$ – значения плотности при температурах 4 и 5 °C соответственно. День, когда величина RTR принимает максимальное значение, принято называть медианным. Параметр RTR и связанное с ним понятие медианы оказались весьма удобными при сравнении термической устойчивости водного столба при использовании данных, полученных в разные летние дни и в разные годы. В частности, можно ожидать, что наиболее близкими к рассчитанным модельным равновесным профилям могут оказаться такие реальные профили, которые характерны для того периода устойчивой летней стратификации, когда параметр RTR принимает

близкие к максимальному значения. Иначе говоря, в контексте задачи верификации полученных в данной работе равновесных профилей наиболее подходящими для сравнения будут те экспериментальные профили, которые получены в медианный день года или в близкие к нему дни.

Используя указанный критерий выбора объектов и экспериментальных данных, для верификации рассчитанных равновесных профилей была использована представленная в открытом доступе база данных по летней термической стратификации трех крупных озер Анси, Бурже и Женевского (Annecy, Bourget and Geneva) Центральной Европы [Pilla et al., 2020b], созданная по результатам многолетних измерений. При этом для анализа отобраны профили, полученные в наиболее близкие к медиане дни каждого года (когда RTR было максимальным). Во всех трех озерах измерения проводились в точках наибольшей глубины во всей толще от поверхности до дна. Выбранные температурные профили были приведены к универсальному виду, сгруппированы в экспериментальные серии с одинаковым шагом 0,5 м по вертикали; при необходимости использовалась линейная интерполяция. Детали отбора и обработки экспериментальных температурных профилей представлены в разделе 2.2 статьи [Richardson et al., 2017]. Пересчет температуры в плотность осуществлялся по формуле Чена – Миллеро [Chen, Millero, 1986].

Для сопоставления отобранных экспериментальных профилей с равновесным модельным профилем (9) требуется конкретизировать значения констант C_1 и C_2 . Эти значения, в свою очередь, можно найти из системы уравнений (10), после непосредственного вычисления массы m и потенциальной энергии E_p по опытным данным. Однако с технической точки зрения такая процедура труднореализуема, поскольку обе величины m и E_p должны быть определены с весьма высокой степенью точности. Так, например, вариации ΔE_p потенциальной энергии при трансформации профиля от двухслойного к линейно стратифицированному составляют $gH^2(\rho_b - \rho_s)/24$, и, соответственно, абсолютная погрешность вычисления E_p во всяком случае не должна превышать указанного значения. Поскольку эта погрешность, с учетом представления $E_p \sim mgH \sim \bar{\rho}gH^2$ (здесь $\bar{\rho} = m/H$), определяется в основном погрешностью ΔH измерения величины H , ее можно представить в виде $2\bar{\rho}gH\Delta H$. Чтобы эта погрешность хотя бы не превышала указанного характерного значения вариаций величины E_p , должно выполняться условие: $\Delta H/H \leq (\rho_b - \rho_s)/(48\bar{\rho})$, причем, строго говоря, полученное неравенство здесь следует рассматривать как строгое,

заменяя $\leq$ на $\ll$. Характерным для правой части неравенства является значение 10^{-4} ; это означает, что относительная погрешность измерения величины H не должна превышать 0,01 % – для озера глубиной 10 м это соответствует погрешности в 1 мм. Измерить H с такой точностью

не удастся, поэтому константы C_1 и C_2 определялись по методу наименьших квадратов.

На рис. 4 представлены результаты сопоставления рассчитанных равновесных профилей с соответствующими экспериментальными на примере озера Бурже. Всего было отобрано

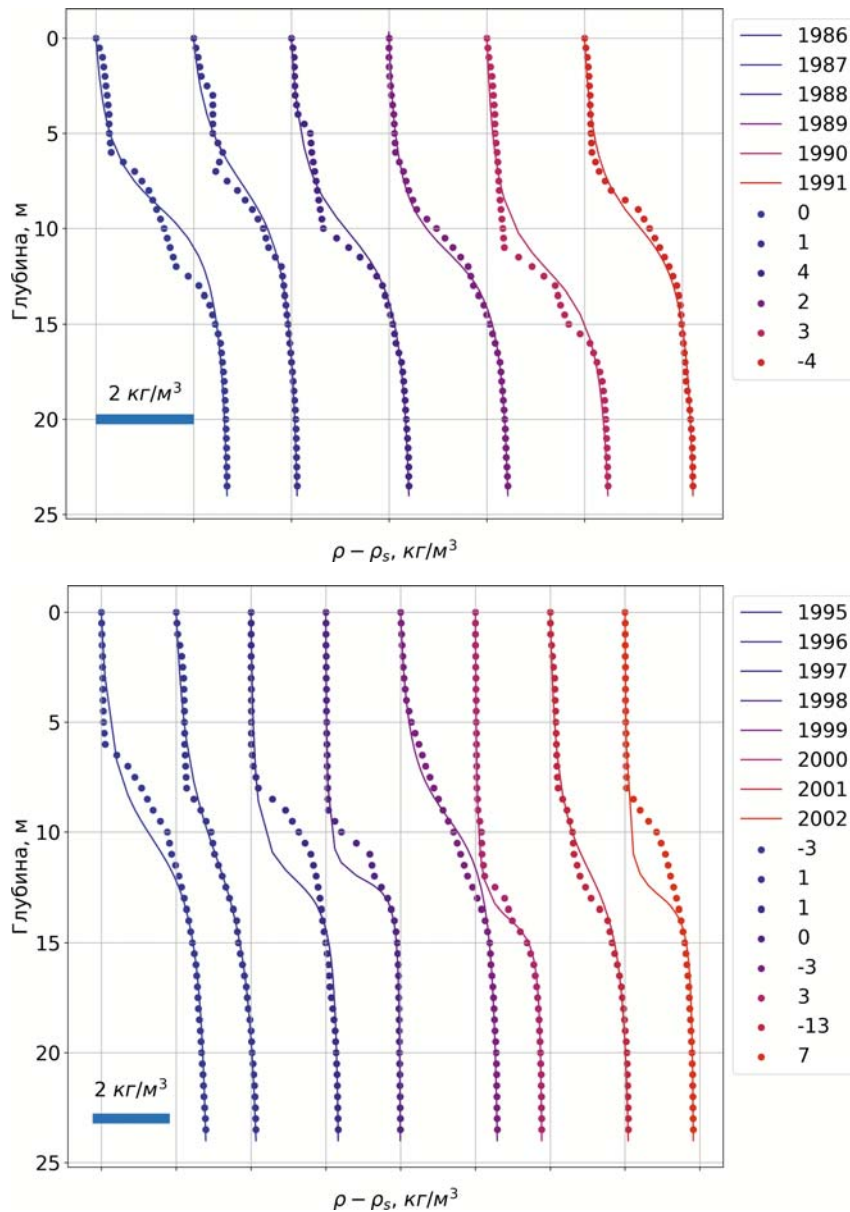


Рис. 4. Профили плотности в озере Бурже в период максимальной летней стратификации: с 1986 по 1991 (верхняя панель) и с 1995 по 2008 (нижняя панель) годы. Линии с маркерами представляют экспериментальные профили, сплошные линии – рассчитанные по формуле (9) модельные. Для каждой пары линий в легенде представлен год измерений и номер соответствующего дня, отсчитываемый от медианы

Fig. 4. Density profiles in Lake Bourget during the period of the maximum summer stratification: from 1986 to 1991 (upper panel) and from 1995 to 2008 (lower panel). The lines with markers represent experimental profiles, the solid lines represent model profiles calculated using formula (9). For each pair of lines, the legend shows the year of measurements and the corresponding day number, measured from the median

14 профилей (по одному за 14 лет наблюдений), описывающих термическую структуру верхнего 25-метрового слоя в дни, наиболее близкие к медианным. Для всех приведенных пар профилей (экспериментального и модельного) коэффициент корреляции Пирсона составлял не менее 0,98.

Аналогичные результаты получены при обработке профилей плотности для озер Анси и Женевского. Для примера на рис. 5 представлены экспериментальные и расчетные профили для периодов с 1998 по 2005 и с 1974 по 1989 годы соответственно. Коэффициент

корреляции варьировался в пределах от 0,935 до 0,995 и от 0,980 до 0,999 для озер Анси и Женевского соответственно.

Как уже отмечалось, модельные профили (9) следует рассматривать в качестве гипотетических или асимптотических, в том смысле, что они могут быть реализованы лишь в случае и как результат релаксации системы к состоянию равновесия при условии отсутствия внешних воздействий. Вероятность экспериментального обнаружения подобных профилей весьма мала. Однако при апробации метода в качестве альтернативы «равновесности» можно

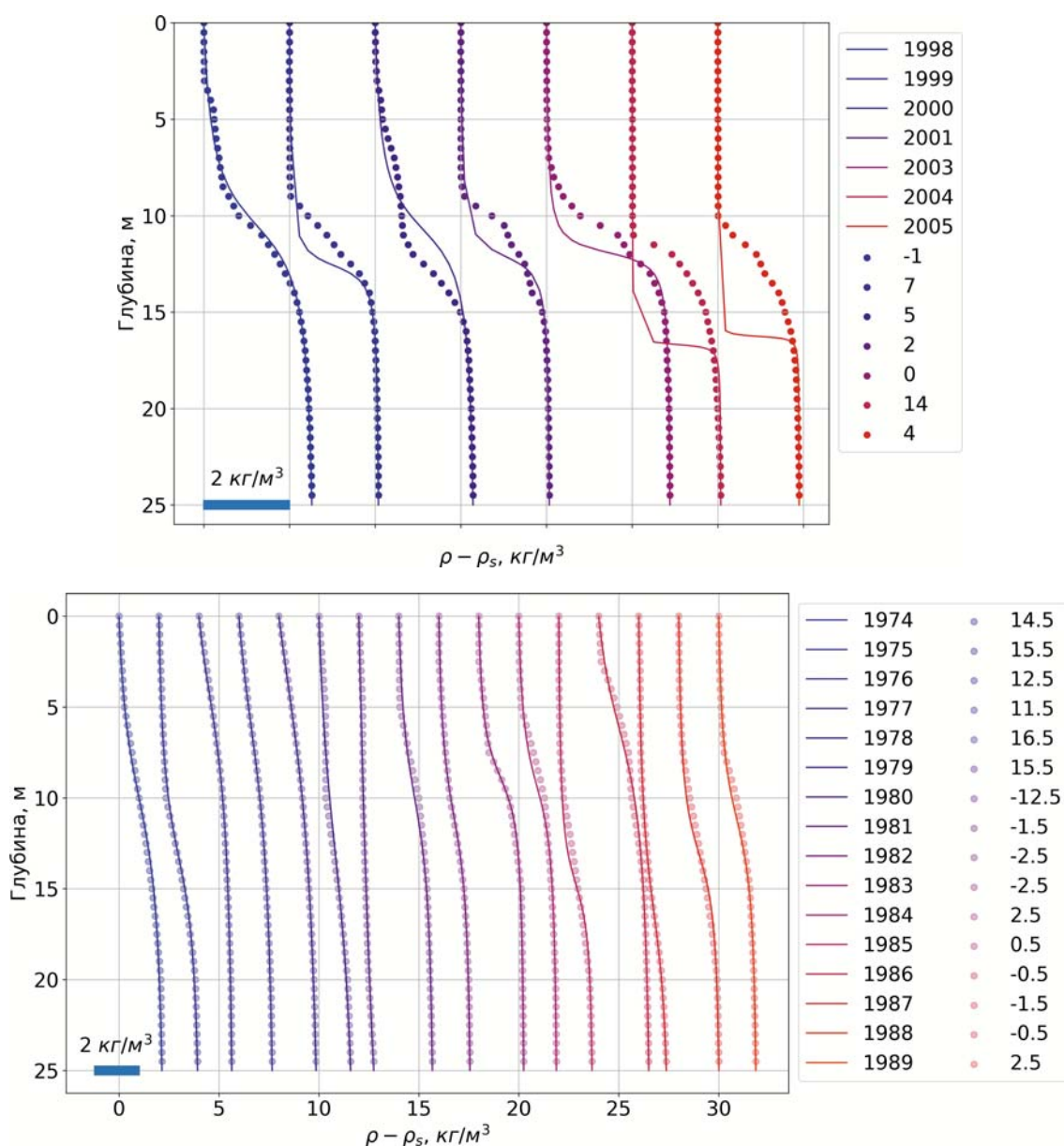


Рис. 5. Экспериментальные и модельные профили для озера Анси (верхняя панель) и Женевского (нижняя панель)

Fig. 5. Experimental and model profiles for Lake Annecy (top panel) and Lake Geneva (bottom panel)

использовать свойство «средневзвешенности». А именно, при условии стабильности климатических параметров в течение какого-то количества лет можно предположить, что и параметры системы будут стабильными и воспроизводиться от года к году, хотя и с некоторыми погрешностями. В этом случае, при наличии необходимых экспериментальных данных в рассматриваемом промежутке лет, можно ввести в рассмотрение понятие «климатического года», параметры для каждого дня которого можно рассчитать как средние значения по всем годам наблюдений [Piccolroaz et al., 2013] и считать их репрезентативными для «климатического года».

В частности, вместо одного профиля, характеризующего водный столб в определенный день одного года, можно рассмотреть усредненный за многие годы профиль для соответствующего дня. Подобное усреднение (отчасти устраняющее межгодовую изменчивость) позволяет выявить наиболее вероятную конфигурацию профиля для каждого рассматриваемого дня гипотетического «климатического года». Хотя подобные профили, строго говоря, не будут совпадать с равновесными, сама процедура их построения нивелирует различные внешние воздействия, хотя бы за счет усреднения случайных по времени фаз этих воздействий.

Можно также ожидать, что указанные усредненные профили будут наиболее близки к равновесным в дни, близкие к медианным.

Расчеты показали, что при использовании данных по «климатическому году» корреляция эксперимента и модели существенно возрастает. Для примера на рис. 6 представлены профили для всех трех озер, полученные при усреднении экспериментальных данных по соответствующим интервалам лет (см. рис. 4, 5). Там же представлены соответствующие модельные профили, рассчитанные по формуле (9). Коэффициент корреляции модельных и экспериментальных рядов во всех трех случаях превышал значение 0,99.

Заключение

В работе введено понятие равновесных профилей плотности и с использованием вариационных методов произведен их расчет. Формы равновесных профилей получены в аналитическом виде, что позволяет непосредственно анализировать зависимость ключевых характеристик профиля от основного определяющего параметра – потенциальной энергии. В частности, предложен и апробирован новый метод расчета глубины термоклина.

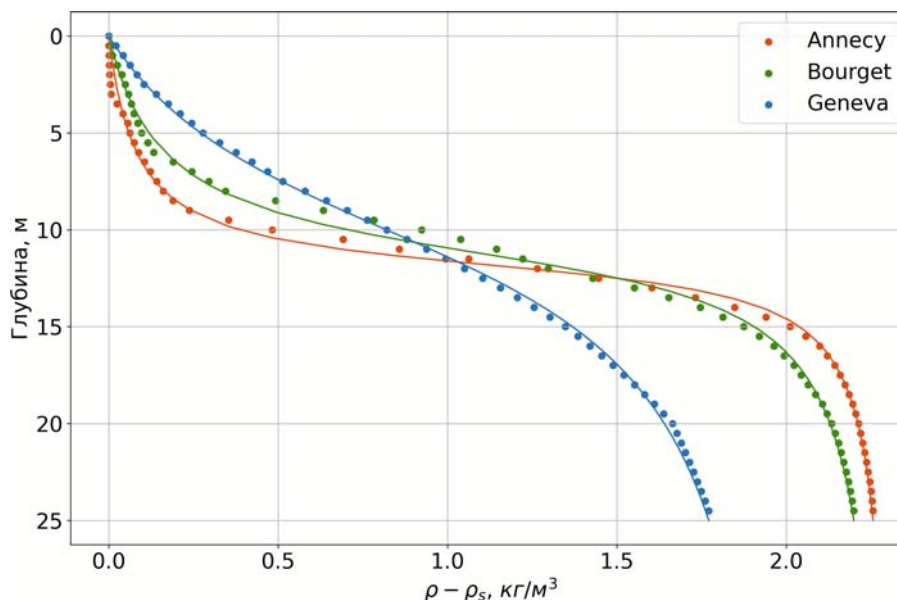


Рис. 6. Средние по климатическому году профили плотности для медианных дней озер Анси, Бурже, Женевского (маркерные линии) и соответствующие им модельные профили (сплошные линии). Для всех трех озер рассматривался лишь верхний 25-метровый слой водного столба

Fig. 6. Climatic-year average density profiles for median days for Lakes Annecy, Bourget, and Geneva (marker lines) and the corresponding model profiles (solid lines). For all three lakes, only the upper 25-meter layer of the water column was considered

Равновесные профили – лишь продукт идеализированной модели, представляющий асимптотическое состояние водной толщи. Однако в работе показано, что экспериментальные профили, полученные в период максимальной летней стратификации, весьма хорошо (с коэффициентом корреляции 0,98 и выше) описываются аналитическими зависимостями, полученными в рамках этой модели.

Можно предположить, что в целом потенциал модели не исчерпывается приведенными результатами и может быть востребован при решении некоторых других актуальных лимнологических задач. В частности, преимущества аналитического представления профиля (и, соответственно, расчета его параметров) могут оказаться полезными при выявлении климатических трендов в ходе анализа большого объема данных, полученных при длительных измерениях. Эти же преимущества можно использовать при решении проблем классификации озер, например, при сравнительном анализе усредненных медианных профилей для озер, отличающихся по географической широте, глубине, площади зеркала.

Сравнение энергетических параметров (прежде всего – потенциальной энергии и эксергии), рассчитываемых по отдельности для экспериментального и модельного профилей, может служить основой для количественной оценки степени близости системы к состоянию равновесия, а также (при рассмотрении переходов из одного энергетического состояния в другое) эффективности перемешивания. Значительный потенциал в отборе критериев и оценке интенсивности перемешивания заключен и в изучении равновесных функций распределения по плотности, которые в рамках предложенного метода задаются в аналитическом виде.

Метод равновесных профилей может оказаться полезным и при решении проблемы, связанной с выявлением активных и пассивных слоев водной толщи, разнесением понятий «перемешанный» и «перемешиваемый» слой (дилемма «mixing» vs «mixed» [Sutherland et al., 2014]). Например, при сравнении экспериментального и модельного профилей можно рассматривать не весь столб жидкости, а какую-то его часть, исключая, например, приповерхностные, хорошо перемешанные, или придонные слои. В общем случае степень близости базовой и аппроксимирующей кривой будет изменяться, при этом можно ожидать, что кривые будут максимально близки для тех слоев, в которых процессы перемешивания уже практически завершились.

Наконец, следует также упомянуть о возможности модификаций самого метода вывода равновесных профилей. Возможные варианты включают, в частности, использование (вместо заданных ρ_s и ρ_b) граничных условий второго и третьего рода на границах, а также включение в рассмотрение дополнительных (по отношению к m и E_p) определяющих параметров.

Литература

- Chen C.-T. A., Millero F. J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range // *Limnol. Oceanogr.* 1986. Vol. 31, no. 3. P. 657–662. doi: 10.4319/lo.1986.31.3.0657
- Kraus E. B., Turner J. S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline: II. The general theory and its consequences // *Tellus.* 1967. Vol. 19, iss. 1. P. 98–106. doi: 10.3402/tellusa.v19i1.9753
- Naumenko M., Guzivaty V. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga // *Limnol. Rev.* 2023. Vol. 23. P. 177–189. doi: 10.3390/limnolrev23030011
- Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013. Vol. 17, no. 8. P. 3323–3338. doi: 10.5194/hess-17-3323-2013
- Pilla R. M., Anneville O. Time series dataset of water temperature profiles during stable summer stratification in Lakes Annecy, Bourget and Geneva // *Portail Data INRAE, V1. Recherche Data Gouv.* 2020b. doi: 10.15454/YOLA0Y
- Pilla R. M., Mette E. M., Williamson C. E. et al. Global data set of long-term summertime vertical temperature profiles in 153 lakes // *Sci. Data.* 2021. Vol. 8. Art. 200. doi: 10.1038/s41597-021-00983-y
- Pilla R. M., Williamson C. E., Adamovich B. V. Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes // *Sci. Rep.* 2020a. Vol. 10. Art. 20514. doi: 10.1038/s41598-020-76873-x
- Reichl B. G., Adcroft A., Griffies S. M., Hallberg R. A potential energy analysis of ocean surface mixed layers // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2022. Vol. 127. e2021JC018140. doi: 10.1029/2021JC018140
- Richardson D. C., Melles S. J., Pilla R. M., Hetherington A. L., Knoll L. B., Williamson C. E., Kraemer B. M., Jackson J. R., Long E. C., Moore K., Rudstam L. G., Rusak J. A., Saros J. E., Sharma S., Strock K. E., Weathers K. C., Wigdahl-Perry C. R. Transparency, geomorphology and mixing regime explain variability in trends in lake temperature and stratification across Northeastern North America (1975–2004) // *Water.* 2017. Vol. 9(6). P. 442. doi: 10.3390/w9060442
- Sundaram T. R., Rehm R. G. The seasonal thermal structure of deep temperate lakes // *Tellus.* 1973. Vol. 25. P. 157–168. doi: 10.1111/j.2153-3490.1973.tb01602.x
- Sutherland G., Reverdin G., Marié L., Ward B. Mixed and mixing layer depths in the ocean surface boundary layer under conditions of diurnal stratification // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41, no. 23. P. 8469–8476. doi: 10.1002/2014GL061939

Tabak E. G., Tal F. A. Mixing in simple models for turbulent diffusion // *Commun. Pure Appl. Maths.* 2004. Vol. 57, no. 5. P. 563–589. doi: 10.1002/cpa.20012

Toffolon M., Yousefi A., Piccolroaz S. Estimation of the thermally reactive layer in lakes based on surface water temperature // *Water Resour. Res.* 2022. Vol. 58. e2021WR031755. doi: 10.1029/2021WR031755

Venaille A., Gostiaux L., Sommeria J. A statistical mechanics approach to mixing in stratified fluids // *J. Fluid Mech.* 2017. Vol. 810. P. 554–583. doi: 10.1017/jfm.2016.721

Winters K., Lombard P., Riley J., D'Asaro E. Available potential energy and mixing in density-stratified fluids // *J. Fluid Mech.* 1995. Vol. 289. P. 115–128. doi: 10.1017/S002211209500125X

Wykes M. S. D., Hughes G. O., Dalziel S. B. On the meaning of mixing efficiency for buoyancy-driven mixing in stratified turbulent flows // *J. Fluid Mech.* 2015. Vol. 781. P. 261–275. doi: 10.1017/jfm.2015.462

References

Chen C.-T. A., Millero F. J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. *Limnol. Oceanogr.* 1986;31(3):657–662. doi: 10.4319/lo.1986.31.3.0657

Kraus E. B., Turner J. S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline: II. The general theory and its consequences. *Tellus.* 1967;19(1):98–106. doi: 10.3402/tellusa.v19i1.9753

Naumenko M., Guzivaty V. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga. *Limnol. Rev.* 2023;23:177–189. doi: 10.3390/limnolrev23030011

Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013; 17(8):3323–3338. doi: 10.5194/hess-17-3323-2013

Pilla R. M., Anneville O. Time series dataset of water temperature profiles during stable summer stratification in Lakes Annecy, Bourget and Geneva. *Portail Data INRAE, V1. Recherche Data Gouv.* 2020. doi: 10.15454/YOLA0Y

Pilla R. M., Mette E. M., Williamson C. E. et al. Global data set of long-term summertime vertical temperature

profiles in 153 lakes. *Sci. Data.* 2021;8:200. doi: 10.1038/s41597-021-00983-y

Pilla R. M., Williamson C. E., Adamovich B. V. Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes. *Sci. Rep.* 2020;10:20514. doi: 10.1038/s41598-020-76873-x

Reichl B. G., Adcroft A., Griffies S. M., Hallberg R. A potential energy analysis of ocean surface mixed layers. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2022. Vol. 127. e2021JC018140. doi: 10.1029/2021JC018140

Richardson D. C., Melles S. J., Pilla R. M., Hetherington A. L., Knoll L. B., Williamson C. E., Kraemer B. M., Jackson J. R., Long E. C., Moore K., Rudstam L. G., Rusak J. A., Saros J. E., Sharma S., Strock K. E., Weathers K. C., Wigdahl-Perry C. R. Transparency, geomorphology and mixing regime explain variability in trends in lake temperature and stratification across Northeastern North America (1975–2004). *Water.* 2017;9(6):442. doi: 10.3390/w9060442

Sundaram T. R., Rehm R. G. The seasonal thermal structure of deep temperate lakes. *Tellus.* 1973;25:157–168. doi: 10.1111/j.2153-3490.1973.tb01602.x

Sutherland G., Reverdin G., Marié L., Ward B. Mixed and mixing layer depths in the ocean surface boundary layer under conditions of diurnal stratification. *Geophys. Res. Lett.* 2014;41(23):8469–8476. doi: 10.1002/2014GL061939

Tabak E. G., Tal F. A. Mixing in simple models for turbulent diffusion. *Commun. Pure Appl. Maths.* 2004; 57(5):563–589. doi: 10.1002/cpa.20012

Toffolon M., Yousefi A., Piccolroaz S. Estimation of the thermally reactive layer in lakes based on surface water temperature. *Water Resour. Res.* 2022;58: e2021WR031755. doi: 10.1029/2021WR031755

Venaille A., Gostiaux L., Sommeria J. A statistical mechanics approach to mixing in stratified fluids. *J. Fluid Mech.* 2017;810:554–583. doi: 10.1017/jfm.2016.721

Winters K., Lombard P., Riley J., D'Asaro E. Available potential energy and mixing in density-stratified fluids. *J. Fluid Mech.* 1995;289:115–128. doi: 10.1017/S002211209500125X

Wykes M. S. D., Hughes G. O., Dalziel S. B. On the meaning of mixing efficiency for buoyancy-driven mixing in stratified turbulent flows. *J. Fluid Mech.* 2015; 781:261–275. doi: 10.1017/jfm.2015.462

Поступила в редакцию / received: 02.03.2026; принята к публикации / accepted: 07.05.2026.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Богданов Сергей Рэмович

д-р физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Bogdanov, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Leading Researcher

УДК 556.555

СЕЗОННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И МУТНОСТИ ВОДЫ В ГЛУБОКОМ ДИМИКТИЧЕСКОМ ОЗЕРЕ

Р. Э. Здоровеннов, Г. Э. Здоровеннова*

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. Александра Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*zdorovennova@gmail.com

Приведены результаты анализа сезонной и пространственной изменчивости температуры, мутности воды и концентрации хлорофилла *a* в глубоком озере Мунозеро (водосбор Онежского озера). Анализ данных зондирования водной толщи озера мультипараметрическим зондом CTD-90m на продольном разрезе позволил установить особенности термического режима северного глубоководного (глубины более 35 м) и южного (глубины менее 20 м) плесов озера. Стратификация продолжается дальше в северном плесе, что обуславливает меньшее содержание кислорода в гипolimнии осенью. Обнаружено отличие придонной температуры воды северного (менее 5 °С) и южного (до 9,7 °С) плесов, что может оказывать влияние на бентосное сообщество. Экстремальное повышение температуры верхнего слоя воды до 26–27 °С в периоды жаркой погоды летом представляет опасность для экосистемы озера, так как может способствовать массовому развитию фитопланктона, включая токсичных цианобактерий, а также быть причиной гибели форели в садках. Выявлены зоны повышенных значений мутности воды в северном глубоководном плесе озера. В сезонном аспекте прослеживается заглубление слоя повышенных значений мутности по мере заглубления сезонного термоклина. Повышенные значения мутности в придонных слоях глубоководной северной котловины свидетельствуют о накоплении осаждающегося взвешенного вещества, что может представлять опасность для озера с замедленным водообменом. Наиболее вероятной причиной повышения мутности воды в озере является деятельность форелевого хозяйства и туристических комплексов.

Ключевые слова: глубокое озеро; температура воды; мутность; термоклин; сезонные изменения; форелевое хозяйство

Для цитирования: Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Сезонная и пространственная изменчивость температуры и мутности воды в глубоком димиктическом озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 18–28. doi: 10.17076/lim2338

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, FMEN 2026-0011).

R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova*. SEASONAL AND SPATIAL VARIABILITY OF TEMPERATURE AND TURBIDITY IN A DEEP DYMICTIC LAKE

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *zdorovennova@gmail.com

The results of an analysis of seasonal and spatial variability in water temperature and turbidity, and the concentration of chlorophyll-a in the deep Lake Munozero (Lake Onego catchment) are presented. Analysis of longitudinal sounding data using a CTD-90m multiparameter probe allowed us to analyze the thermal regime of the deep-water northern (depths greater than 35 m) and southern (depths less than 20 m) parts of the lake. Stratification in the deep-water northern part lasts longer, resulting in lower oxygen content in the hypolimnion in autumn. A difference in bottom water temperatures was observed between the northern (less than 5 °C) and southern (up to 9.7 °C) parts of the lake, which may impact the benthic community. Water temperature spikes in the lake's upper layer to extreme 26–27 °C during hot summer weather pose a threat to the lake's ecosystem, as they can boost the growth of phytoplankton, including toxic cyanobacteria, and can also cause the death of trout in cages. Zones of high water turbidity have been identified in the deep-water northern part of the lake. Seasonally, the layer of high turbidity has been observed to move deeper with the deepening of the seasonal thermocline. High turbidity in the bottom layers of the deep northern basin indicates the accumulation of precipitating suspended matter, which may pose a risk in a lake with a slow flushing rate. The most likely cause of the increased water turbidity in the lake is the activities of the trout farm and tourist facilities.

Keywords: deep lake; water temperature; turbidity; thermocline; seasonal changes; trout farm

For citation: Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Seasonal and spatial variability of temperature and turbidity in a deep dymictic lake. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 18–28. doi: 10.17076/lim2338

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (FMEN 2026-0011).

Памяти А. В. Сабылиной

Введение

Озеро Мунозеро – одно из лучших в Карелии по питьевым качествам воды. Вода этого озера характеризуется высокой минерализацией (100 мг/л) и низким содержанием органического вещества (2–4 мг/л) [Сабылина, Икко, 2019], в то время как вода большинства карельских озер имеет существенно меньшую минерализацию (20–60 мг/л) и большее содержание органического вещества (10–100 мг/л) [Озера..., 2013]. Северная часть оз. Мунозеро входит в состав территории заповедника «Кивач».

К сожалению, антропогенное воздействие на этот уникальный водоем с каждым годом возрастает. В северном глубоководном плесе озера с 2022 г. функционирует форелевое хозяйство ООО «Риф» (объем производства товарной форели – 100 т в год [Ассоциация...]),

являющееся источником биогенных и органических веществ [Макарова и др., 2025]. Озеро используется в качестве источника коммунально-бытового водоснабжения ряда сельских поселений (Спасская Губа, Тереки, Мунозеро и др.), сброс хозяйственно-бытовых сточных вод производится без очистки прямо в озеро. Сброс сточных вод пос. Марциальные Воды, санаториев «Марциальные воды» и «Дворцы» производится в небольшое озеро, сообщаемое с южным плесом оз. Мунозеро. Вследствие этого за последние три десятилетия в химическом составе воды оз. Мунозеро произошли изменения: увеличилось содержание хлоридных ионов, ионов натрия и общего фосфора, возросло биохимическое потребление кислорода [Сабылина, Икко, 2019; Сабылина и др., 2020]. Выявлено влияние выбросов ЦБК, расположенного в 20 км от озера в г. Кондопоге, на химический состав снега на льду озера (высокие концентрации сульфат-ионов – 1,3–1,7 мг/л) [Сабылина и др., 2020].

Озеро используется в целях рекреации, туризма, любительского рыболовства. При использовании лодок с бензиновыми двигателями, снегоходов происходит загрязнение воды и снежно-ледяного покрова озера горюче-смазочными веществами. В 1968, 1983, 2002 и 2018 гг. содержание нефтепродуктов в воде озера изменялось в пределах 0,02–0,10 мг/л при уровне ПДК для питьевых вод и рыбохозяйственных водоемов 0,3 и 0,05 мг/л соответственно [Сабылина, Икко, 2019]. Существенно более высокие концентрации нефтепродуктов, превышающие ПДК для рыбохозяйственных водоемов в три раза, обнаружены как в северном (0,16 мг/л), так и в южном (0,13–0,15 мг/л) плесах озера в июле 2025 г. [Макарова и др., 2025]. Все эти изменения свидетельствуют об усиливающемся загрязнении водоема.

Выявленные изменения представляют опасность для чувствительной экосистемы этого уникального северного озера и в будущем могут привести к деградации его экосистемы. Происходящие изменения регионального климата южной Карелии [Назарова и др., 2022; Здоровеннова и др., 2025] усиливают негативное антропогенное воздействие на озеро. Все это актуализирует необходимость проведения регулярной оценки состояния оз. Мунозеро для предотвращения деградации его экосистемы.

Исследования оз. Мунозеро проводятся в рамках темы НИР «Функционирование экосистемы Онежского озера и озерно-речных систем его водосборной территории в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия» (FMEN 2026-0011). Основное внимание исследователей в предыдущие годы было направлено на изучение химического режима озера [Озера..., 2013; Сабылина, Икко, 2019; Сабылина и др., 2020], планктонного, бентосного и рыбного сообществ [Макарова, 2019, 2020; Фомина и др., 2022; Сидорова, Георгиев, 2024], в то время как особенности сезонных и пространственных изменений таких показателей, как температура и мутность воды, концентрация хлорофилла *a*, оставались недостаточно изученными. В летние и осенние сезоны 2023–2025 гг. были проведены пространственные измерения этих показателей в озере на станциях продольного разреза (рис. 1). Цель данной работы – выявить закономерности пространственной и временной изменчивости температуры и мутности воды озера Мунозеро, концентрации хлорофилла *a* по данным полевых измерений 2023–2025 гг.

Объект исследования и методы

Оз. Мунозеро (61°14' с. ш. 33°51' в. д.) находится на водосборе р. Шуя (приток Онежского озера) и принадлежит к бассейну Балтийского моря (рис. 1). Площадь водосбора озера – 25,6 км², площадь зеркала – 13,2 км², средняя и максимальная глубины – 14,5 и 50,0 м, объем водной массы – 190 млн м³. В озеро впадает 7 ручьев, вытекает р. Мунозерка; объем речного стока в озеро (7,91 млн м³) соизмерим с объемом атмосферных осадков на зеркало (7,39 млн м³) [Озера..., 2013]. Ледостав продолжается с конца ноября до начала мая. Период водообмена озера около 15 лет. Режим перемешивания озера димиктический с двумя периодами перемешивания водной толщи – весной после схода льда и осенью. Оз. Мунозеро – ультраолиготрофное гидрокарбонатного класса группы Са, олиготрофное [Озера..., 2013]. Цветность вод низкая (20–30 град.), прозрачность достигает 4–5 м. По микробиологическим показателям северо-западный плес водоема характеризуется как переходный от олиготрофного к мезотрофному [Макарова, 2019], южный – как мезотрофный [Макарова, 2020]. По показателям планктона пелагическая система характеризуется как олигомезотрофная [Фомина и др., 2022]. Биомасса макрозообентоса составляет в литоральной зоне 3,6 г/м², в глубоководной части – 2,73 г/м², что позволяет отнести озеро к малокормным водоемам [Сидорова, Георгиев, 2024].

Зондирования водной толщи озера проведены в июне и октябре 2023 г., мае и августе 2024 г., июле и октябре 2025 г. на станциях продольного разреза (рис. 1) мультипараметрическим зондом CTD-90m. Измеряемые параметры – температура и мутность воды. По данным зондирований построены пространственные распределения измеряемых параметров в программе Surfer 15.6.3.

Результаты и обсуждение

Проведенные измерения выявили особенности сезонного изменения температуры воды в северном глубоководном (глубины более 35 м) и южном мелководном (глубины менее 20 м) плесах озера (табл.). В летний период верхний 3–5-метровый слой оз. Мунозеро хорошо прогревается. В июле 2023 г., мае и августе 2024 г. температура воды верхнего слоя озера как северного, так и южного плесов изменялась в пределах 15–20 °С, что довольно типично для северных озер [Озера..., 2013].

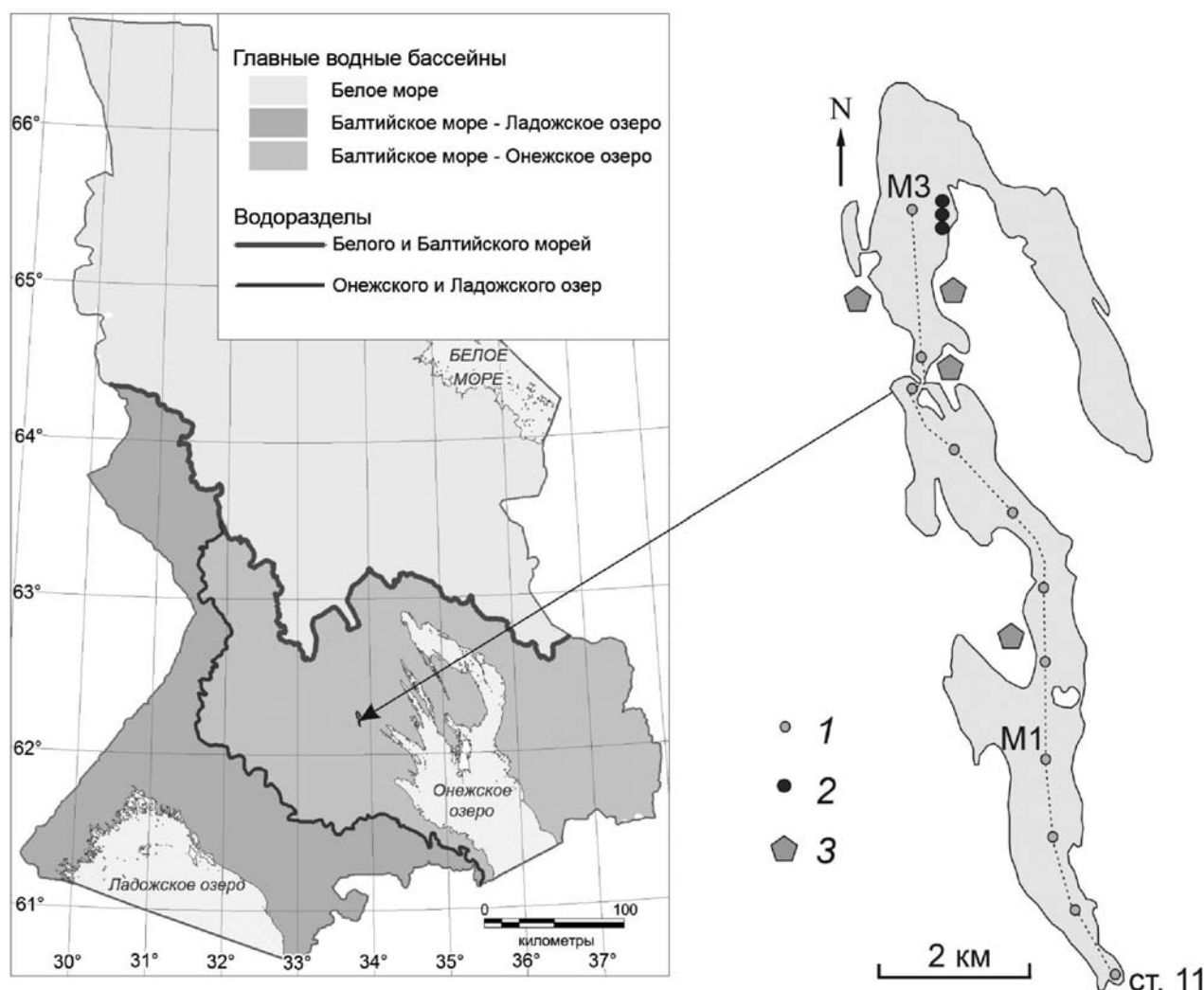


Рис. 1. Положение озера Мунозеро на карте Карелии: 1 – станции зондирования, 2 – форелевые садки, 3 – туристические комплексы. Пунктирная линия – продольный разрез

Fig. 1. Location of Lake Munozero on the map of Karelia: 1 – sounding stations, 2 – trout cages, 3 – tourist complexes. The dotted line is the longitudinal section

Аномальный прогрев верхнего слоя озера произошел в конце июля 2025 г.; тогда было зафиксировано повышение температуры воды до 26,5 °C в южном плесе озера (рис. 2, а) и до 27,2 °C в северном (рис. 2, б). Экстремальное повышение температуры воды в северных озерах в летний период может быть причиной массового развития фитопланктона («цветение» воды), включая токсичные виды цианобактерий [Смирнова и др., 2021], температурный оптимум которых часто лежит в диапазоне 20–25 °C [Paerl, Huisman, 2008]. В частности, в другом карельском озере Крошнозеро, в котором также действует форелевое хозяйство, в конце июля 2025 г. зафиксированы температура верхнего слоя воды 26–27,4 °C и концентрация Chl-а 80–100 мкг/л [Макарова и др., 2025]. Кроме того, столь высокая

температура воды может спровоцировать гибель форели в садках, что и произошло в некоторых форелевых хозяйствах Карелии в июле 2025 г. [Республика..., 2026].

Температура воды придонного слоя в южном плесе в периоды измерений составляла 6,5–9,7 °C (рис. 2, а) и была выше, чем в северном, где не превышала 5,0 °C (рис. 2, б). Довольно выраженные температурные отличия двух районов озера могут оказывать влияние на бентосное сообщество.

Во все периоды наших измерений (май–октябрь) водная толща северного глубоководного плеса находилась в состоянии термической стратификации (рис. 2, б; 3, а, б; 4, а). В этом районе озера градиент температуры в слое скачка температуры достигал 3,6–5 °C/м на этапе весенне-летнего нагревания (табл.).

Особенности сезонного изменения температуры воды в северном и южном плесах оз. Мунозеро по результатам измерений в 2023–2025 гг.

Features of seasonal changes in water temperature in the northern and southern reaches of Lake Munozero based on measurements in 2023–2025

	$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$H_{\text{т}}$ м / m	dT/dz , $^\circ\text{C}/\text{м} / ^\circ\text{C}/\text{m}$
	7 июля 2023 г. / July 7, 2023			
Северный плес Northern reach	18,90	4,33	4,9–9,6	4,56
Южный плес Southern reach	19,06	7,84	4,5–9,1	5,15
	10 октября 2023 г. / October 10, 2023			
Северный плес Northern reach	10,07	4,49	12,2–14,4	3,43
Южный плес Southern reach	9,89	9,70	гомотермия homothermy	гомотермия homothermy
	30 мая 2024 г. / May 30, 2024			
Северный плес Northern reach	15,42	4,49	1,6–6,7	3,67
Южный плес Southern reach	16,59	6,46	1,2–6,7	4,1
	8 августа 2024 г. / August 8, 2024			
Северный плес Northern reach	19,80	4,61	4,8–9,1	5,04
Южный плес Southern reach	20,42	7,38	5,5–8,0	13,71
	31 июля 2025 г. / July 31, 2025			
Северный плес Northern reach	26,75	4,95	2,0–10,0	4,98
Южный плес Southern reach	26,49	9,02	1,6–10,3	5,98
	29 октября 2025 г. / October 29, 2025			
Северный плес Northern reach	7,75	5,00	18,0–18,5	1,55
Южный плес Southern reach	7,34	7,31	гомотермия homothermy	гомотермия homothermy

Примечание. $T_{\text{в}}$ – температура верхнего метрового слоя воды; $T_{\text{п}}$ – температура придонного метрового слоя воды; $H_{\text{т}}$ – глубины слоя скачка температуры (градиент более $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$); dT/dz – максимальный градиент температуры воды в слое скачка.

Note. $T_{\text{в}}$ – temperature of the upper one-meter water layer; $T_{\text{п}}$ – temperature of the near-bottom one-meter water layer; $H_{\text{т}}$ – depth of the thermocline (gradient $> 1\text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$); dT/dz – maximum water temperature gradient within the thermocline.

Поскольку и в мае, и в октябре водная толща северного глубоководного плеса была стратифицирована, можно сделать вывод, что период стратификации в этом районе озера продолжается около пяти месяцев.

Водная толща южного плеса в октябре 2023 и 2025 гг. была перемешана, в остальные периоды измерений – стратифицирована (рис. 2, а; 3, а, б; 4, а). Градиент температуры в слое скачка в южном плесе был несколько больше, чем в северном, и достигал $4\text{--}6\text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$ (табл.); максимальные значения градиента температуры более $13\text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$ обнаружены в слое $5,5\text{--}5,9\text{ м}$ в августе 2024 г.

Мелководный южный плес озера весной позже переходит в состояние стратификации, об этом, в частности, свидетельствует более высокая температура придонной воды в этом районе озера ($6,46\text{ }^\circ\text{C}$) в мае 2024 г. по сравнению с северным глубоководным районом ($4,49\text{ }^\circ\text{C}$). Осенью водная толща южного плеса полностью перемешивается раньше северного: в октябре 2023 и 2025 гг. она была уже перемешана, в то время как в северном стратификация сохранялась (рис. 2, а, б; 4, а). Можно заключить, что стратификация в южном плесе озера продолжается меньше, чем в северном, как за счет более позднего

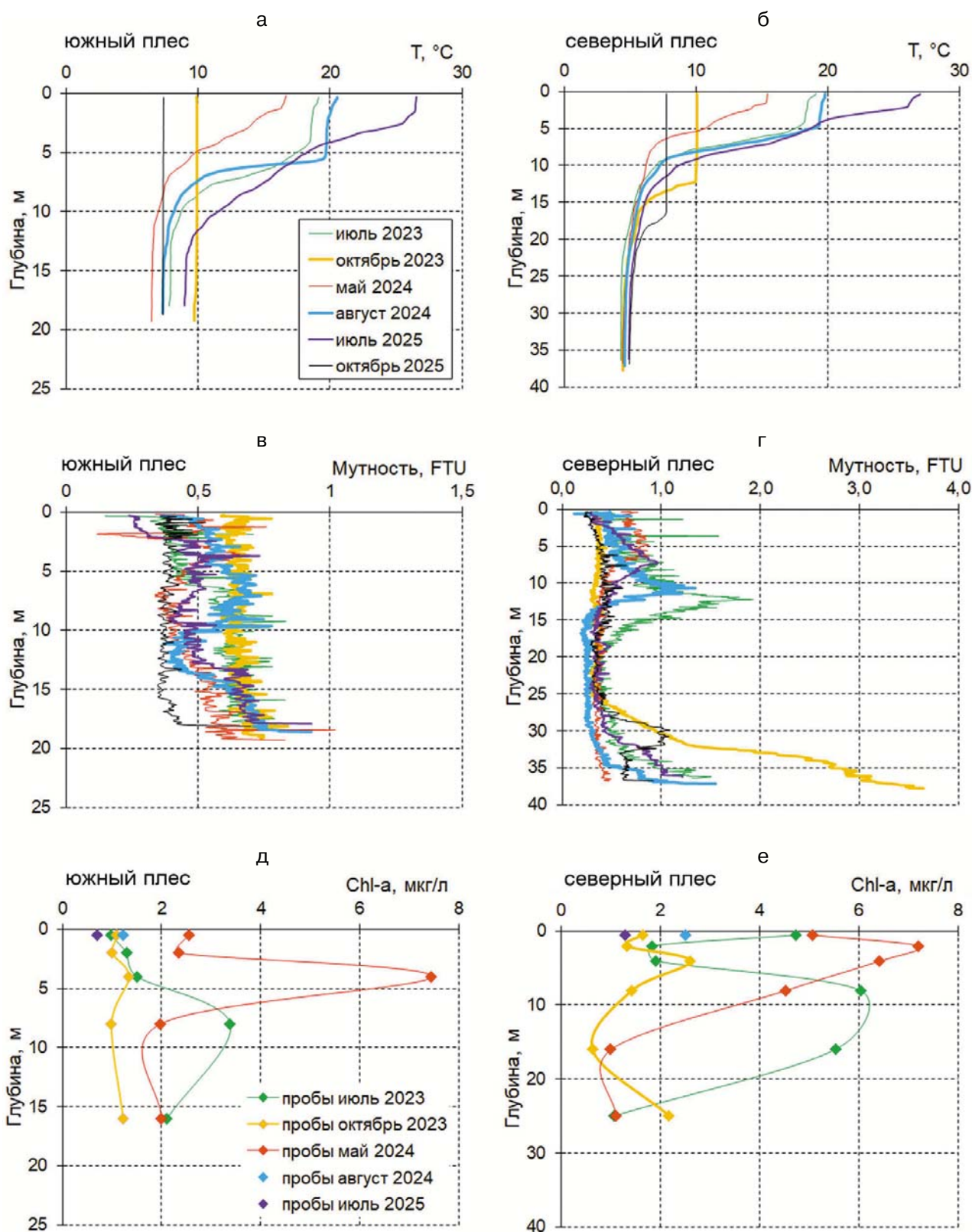


Рис. 2. Вертикальные профили температуры (а, б), мутности (в, г) воды и концентрации хлорофилла а (д, е) в южном плесе оз. Мунозеро на ст. М1 (левые панели) и в северном плесе на ст. М3 (правые панели) в разные годы. Концентрация хлорофилла а дана по: [Макарова и др., 2025].

Fig. 2. Vertical profiles of water temperature (a, б) and turbidity (в, г), and chlorophyll-a concentration (д, е) in the southern reach of Lake Munozero at st. M1 (left panels) and in the northern reach at st. M3 (right panels) in different years. The concentration of chlorophyll-a is given according to [Makarova et al., 2025].

установления, так и за счет более раннего ее разрушения.

Несколько отличающийся режим перемешивания северного и южного плесов озера оказывает влияние на кислородные условия придонных слоев воды. Более длительное существование стратификации в северном плесе определяет менее благоприятные для гидробионтов кислородные условия гипolimниона этого района озера. В частности, согласно [Макарова и др., 2025], в октябре 2023 г. в глубоководном северном плесе, где еще сохранялась

стратификация, концентрация кислорода в придонном слое составляла 2,65 мг/л (20 % насыщения), в то время как в южном плесе придонные слои уже были хорошо насыщены кислородом на фоне активного перемешивания водной толщи (9,6 мг/л при 83 % насыщения). Учитывая результаты многолетних исследований озер умеренной зоны, выявивших связь между увеличением продолжительности стратификации и ухудшением кислородных условий в озерах на фоне потепления климата [Jansen et al., 2024], а также тенденции

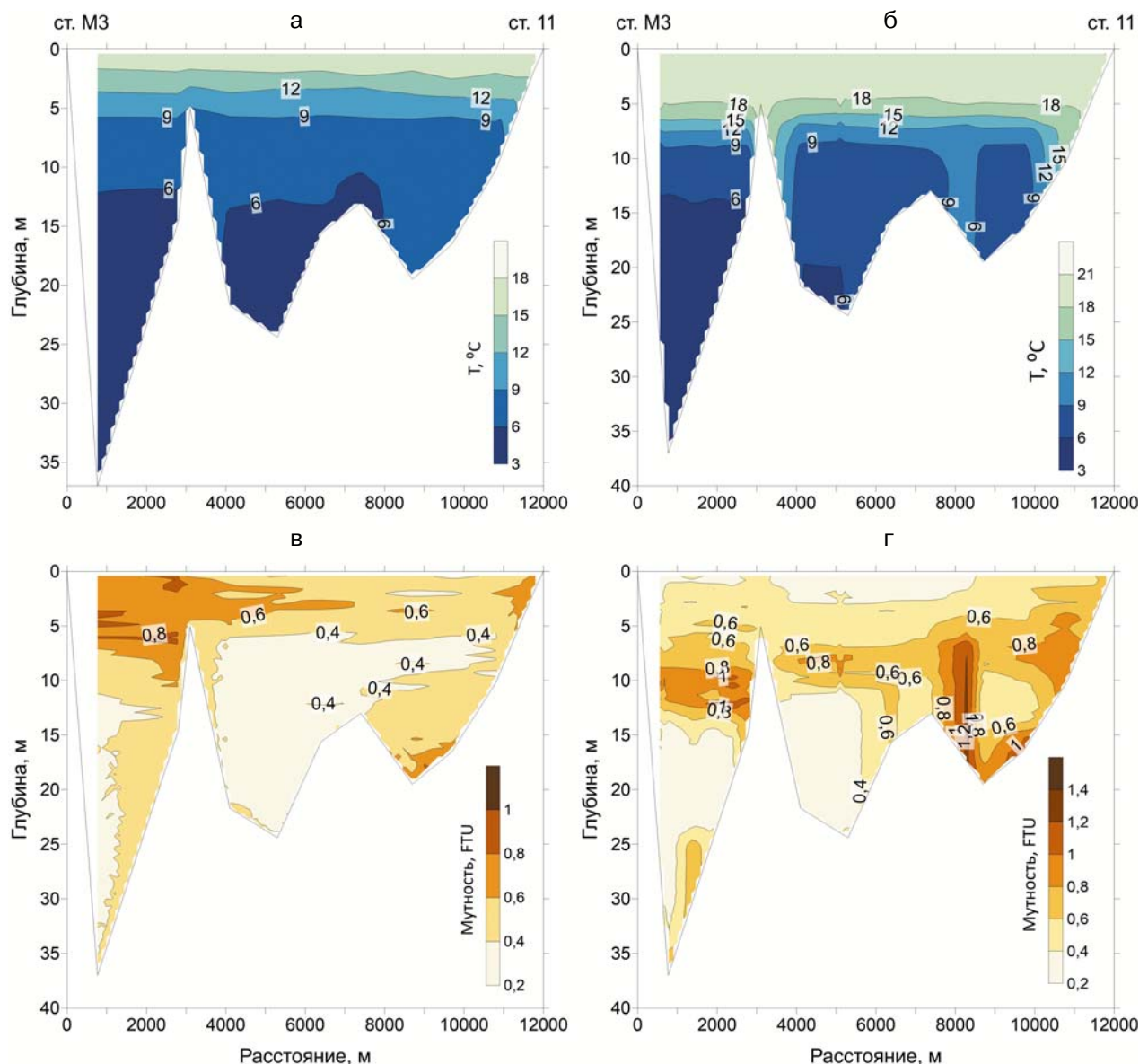


Рис. 3. Распределение температуры воды (а, б) и мутности (в, г) на разрезе от ст. М3 до ст. М11 в мае (левые панели) и августе (правые панели) 2024 г.

Fig. 3. Distribution of water temperature (а, б) and turbidity (в, г) along the section from st. M3 to st. M11 in May (left panels) and August (right panels) 2024

изменений регионального климата Карелии (потепление во все месяцы года [Здоровеннова и др., 2025]), в будущем можно ожидать увеличения периода стратификации и ухудшения кислородных условий в оз. Мунозеро.

Наибольшая опасность при этом угрожает северному глубоководному району озера, испытывающему всевозрастающее антропогенное воздействие (форелевое хозяйство, туристические комплексы).

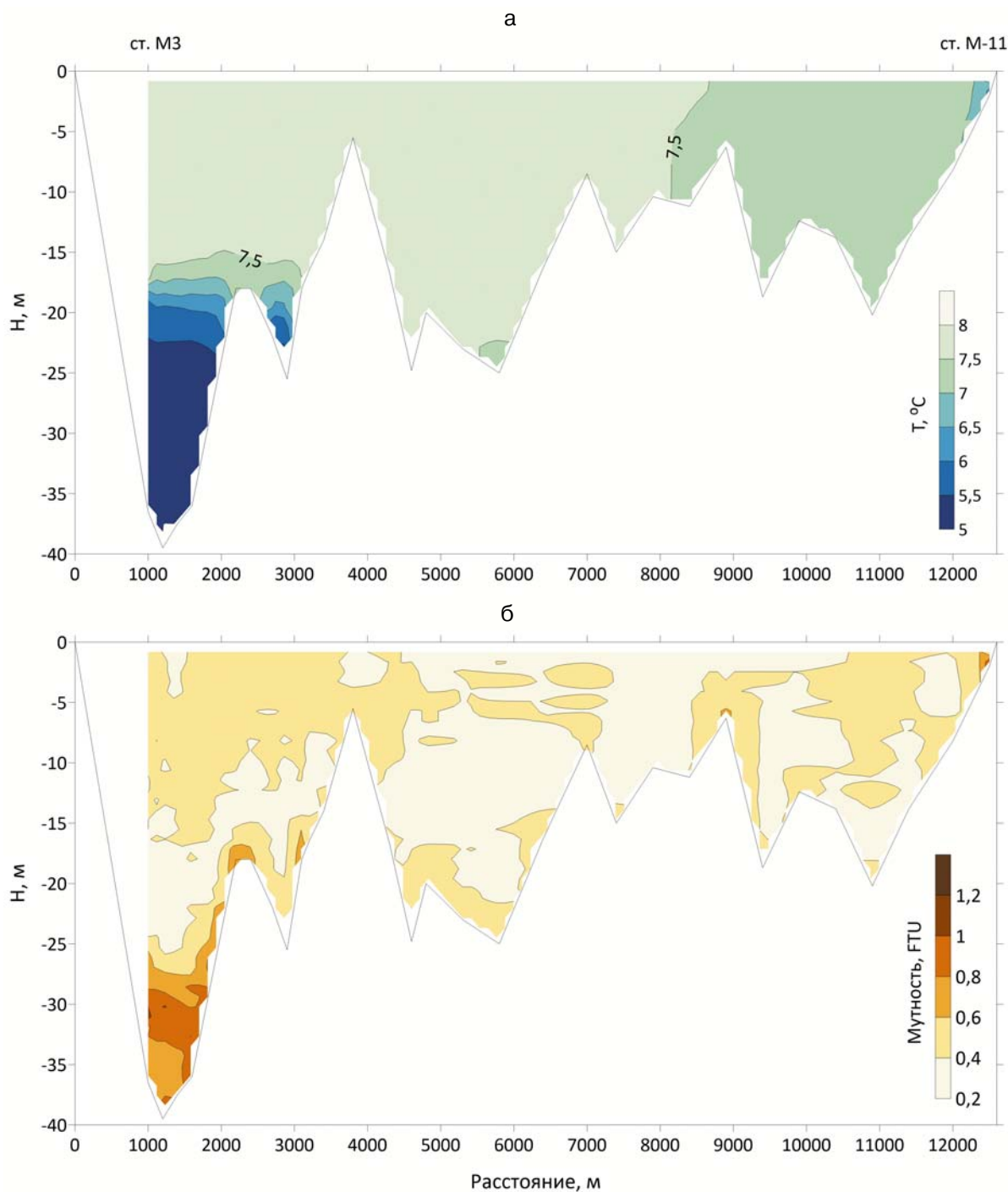


Рис. 4. Распределение температуры воды (а) и мутности (б) на разрезе от ст. М3 до ст. М11 в октябре 2025 г.

Fig. 4. Distribution of water temperature (a) and turbidity (б) along the section from st. M3 to st. M11 in October 2025

Мутность – важный органолептический показатель качества, указывающий на наличие взвеси и загрязнений в воде. Повышенные значения мутности можно рассматривать как показатель, отражающий поступление взвешенного вещества со сточными водами сельских поселений и туристических комплексов, а также в результате деятельности форелевого хозяйства.

Мутность воды в южном плесе озера во все периоды измерений изменялась в пределах 0,4–0,7 FTU (рис. 2, в; 3, в, г; 4, б) и однородно распределялась по водному столбу. В северном плесе (рис. 2, г), где действует форелевое хозяйство и располагается несколько туристических комплексов, мутность воды в целом была выше (до 1–2 FTU), чем в южном. Локальные максимумы мутности (рис. 2, г) в летние месяцы в ряде случаев совпадали по глубине с максимумами Chl-a (рис. 2, е), что отражает влияние скоплений клеток водорослей на показания мутности воды, определяемые мультипараметрическим зондом CTD-90m. Такой же эффект обнаружен в оз. Вендюрское [Белкина и др., 2025]. В сезонном аспекте прослеживается заглубление слоя повышенных значений мутности по мере заглубления сезонного термоклина. В северном плесе в июле 2023 г. на глубинах 10–15 м выявлены максимальные значения мутности (до 2 FTU), а в октябре 2023 г. обнаружены высокие значения мутности (до 3,7 FTU) в слое глубже 25 м (рис. 2, г). Можно предположить, что высокие значения мутности в придонных слоях озера осенью 2023 г. связаны с оседанием взвешенного вещества, которое наблюдалось в водной толще летом. Предположительно, повышение концентрации взвешенного вещества в водной толще летом и в придонных слоях осенью в этом районе озера связано с деятельностью форелевого хозяйства и туристических комплексов. В небольшом оз. Вендюрское, где также действует форелевое хозяйство, в осенний период тоже обнаружено повышение мутности воды придонных слоев глубоководной котловины вследствие осаждения и накопления взвешенного вещества [Белкина и др., 2025].

Концентрация Chl-a в воде является ключевым биоиндикатором, который можно использовать для характеристики интенсивности развития водорослей. Высокие значения этого показателя указывают на активное цветение воды, избыток питательных веществ (азота/фосфора) и ухудшение качества воды. Концентрация Chl-a, как и мутность воды, в целом была несколько выше в северном плесе, чем в южном, во все периоды измерений (рис. 2, д, е).

Концентрация Chl-a достигала 3,4–7,5 мкг/л в фотической зоне, уменьшаясь до 0,4–2,2 мкг/л в слое глубже 10 м (рис. 2, д, е). В июле 2023 и мае 2024 г. измерения, по всей видимости, были проведены в период активного весеннего развития фитопланктона, чем и объясняются существенно более высокие значения концентраций Chl-a (более 6,4–7,4 мкг/л) (рис. 2, д, е) в этот период по сравнению с другими периодами измерений.

Выводы

Анализ данных вертикальных зондирований водной толщи оз. Мунозеро в весенние, летние и осенние месяцы 2023–2025 гг. позволил установить особенности термической структуры озера в разные сезоны, а также выявить особенности распределения мутности и концентраций Chl-a в разных районах озера. Результаты полевых исследований 2023–2025 гг. существенно дополняют и расширяют полученные ранее сведения о термическом режиме озера и особенностях пространственного распределения взвешенного вещества и концентрации хлорофилла а в озере [Озера..., 2013; Сабылина, Икко, 2019; Сабылина и др., 2020].

Установлено, что период стратификации водной толщи в северном глубоководном плесе озера (глубины более 35 м) продолжается с мая до октября, в южном плесе (глубины менее 20 м) стратификация длится меньше, как за счет более позднего начала, так и за счет более раннего окончания. Для точного определения продолжительности периода стратификации в разных районах озера недостаточно данных эпизодических измерений. В этом случае требуется установка в озеро автономных станций для длительных измерений температуры воды.

Более продолжительная стратификация северного плеса является причиной худших кислородных условий в этом районе озера, где придонная гипоксия сохраняется до октября. При сохранении существующих тенденций потепления регионального климата Карелии (потепление во все сезоны года) опасность увеличения продолжительности стратификации и ухудшения кислородных условий угрожает северному глубоководному плесу озера, испытывающему выраженное антропогенное воздействие (форелевое хозяйство и несколько туристических комплексов).

Температура придонного слоя воды южного плеса летом достигает 6,5–9,7 °С, что заметно выше, чем в северном плесе, где она не превышает 5 °С. Отличающийся температурный диапазон и кислородные условия формируют

выраженные отличия в условиях среды обитания, что может оказывать влияние на функционирование и жизненные циклы бентосного сообщества разных районов озера.

Экстремальное повышение температуры воды верхнего слоя озера до 25–27 °С в периоды жаркой погоды летом представляет опасность для экосистемы озера, так как может способствовать массовому развитию фитопланктона, включая токсичных цианобактерий, а также являться причиной гибели форели в садках. В последние годы в летние месяцы в карельских озерах все чаще повторяются продолжительные периоды жаркой погоды, когда температура воды повышается до 25–27 °С и более, что делает разведение форели в садках потенциально опасным видом хозяйственной деятельности для водных экосистем озер Республики Карелия.

Сезонные и пространственные изменения мутности воды оз. Мунозеро свидетельствуют о существенно возросшем антропогенном воздействии на северный плес озера, где наблюдаются повышенные значения мутности в водной толще летом и аккумуляция взвешенного вещества в придонных слоях осенью, что представляет опасность для озера с замедленным водообменом. Предположительно, мутность в северном плесе повышается в результате деятельности форелевого хозяйства и нескольких туристических комплексов на берегах озера. Повышенные значения концентрации хлорофилла *a* в водах оз. Мунозеро также свидетельствуют о выраженном негативном влиянии форелевого хозяйства и туристических комплексов, поставляющих в воду биогенные элементы.

Учитывая уникальный состав и чистоту воды озера Мунозеро, которые необходимо сохранить, очевидно, пора поднимать вопрос о снижении хозяйственного воздействия на этот водоем.

Литература

Ассоциация форелеводств Карелии [Электронный ресурс]. URL: <http://kareliatrout.ru/karta-rybnyh-hoz-jajstv/> (дата обращения: 28.05.2026).

Белкина Н. А., Здорovenнова Г. Э., Ефременко Н. А., Выборова (Кулик) Н. В., Потахин М. С., Богданова М. С., Гатальская Е. В., Здорovenнов Р. Э., Рябинкин А. В., Кухарев В. И., Мясникова Н. А., Субетто Д. А. Накопление осадочного вещества на современном этапе развития лимногенеза территории юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита на примере озера Вендюрского // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2025. № 70(1). С. 30–51. doi: 10.21638/spbu07.2025.102

Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э., Новикова Ю. С., Ефремова Т. В. Термический и ледовый режим Петрозаводской губы Онежского озера в 2023–2024 годах по данным измерений на автономной станции // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 27–38. doi: 10.17076/lim2114

Макарова Е. М. Бактериопланктон северо-западного плеса озера Мунозеро (Республика Карелия) // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. № 2. С. 57–65. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_2_57

Макарова Е. М. Структурно-функциональные особенности бактериопланктона южного плеса оз. Мунозеро (Карелия) // Вестник НВГУ. 2020. № 2. С. 19–25. doi: 10.36906/2311-4444/20-2/03

Макарова Е. М., Здорovenнова Г. Э., Икко О. И., Здорovenнов Р. Э., Митрохов А. В., Сярки М. Т., Сабылина А. В., Новикова Ю. С., Сидорова А. И., Калинин Н. М., Сластина Ю. Л., Пальшин Н. И. Состояние и условия обитания планктонного сообщества малых озер Карелии. База данных RU 2025624656. Дата регистрации: 20.10.2025. Дата публикации: 23.10.2025

Назарова Л. Е., Исакова К. В., Калинин Н. М., Балаганский А. Ф. Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Известия Русского географического общества. 2022. Т. 154, № 1. С. 28–36. doi: 10.31857/S0869607122010086

Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

«Республика» – информационно-аналитический портал Карелии [Электронный ресурс]. URL: <https://rk.karelia.ru/accident/forel-nachala-gibnut-iz-za-zharyv-neskolkih-hozyajstvah-karelii/> (дата обращения: 18.03.2026).

Сабылина А. В., Икко О. И. Изменение химического состава воды озера Мунозеро (Карелия) за последние 60 лет // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 9. С. 76–90. doi: 10.17076/lim1046

Сабылина А. В., Ефремова Т. А., Икко О. И. Химический состав гидрокриогенной системы озер Мунозеро и Урозеро (Республика Карелия, Россия) // Лед и Снег. 2020. Т. 60, № 4. С. 592–600. doi: 10.31857/S2076673420040063

Сидорова А. И., Георгиев А. П. Макрозообентос оз. Мунозера на современном этапе // Трансформация экосистем. 2024. № 7(4). С. 174–186. doi: 10.23859/estr-230124

Смирнова В. С., Теканова Е. В., Калинин Н. М., Чернова Е. Н. Состояние фитопланктона и цианотоксины в пятне «цветения» в озере Святозеро (бассейн Онежского озера, Россия) // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 1(85). С. 50–60. doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т., Сластина Ю. Л. Оценка экологического состояния озера Мунозеро (бассейн Онежского озера) по показателям планктона // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2022. Т. 127(2). С. 37–50.

Jansen J., Simpson G. L., Weyhenmeyer G. A., Härkönen L. H., Paterson A. M., del Giorgio P. A., Prairie Y. T. Climate-driven deoxygenation of northern lakes // *Nat. Clim. Change*. 2024. Vol. 14(8). P. 832–838. doi: 10.1038/s41558-024-02058-3

Paerl H. W., Huisman J. Blooms like it hot // *Science*. 2008. Vol. 320. P. 57–58. doi: 10.1126/science.1155398

References

Association of Trout Breeders of Karelia. (In Russ.). Website. URL: <http://kareliatrout.ru/karta-rybnyh-hozjajstv/> (accessed: 28.05.2026).

Belkina N. A., Zdorovenнова G. E., Efremenko N. A., Vyborova (Kulik) N. V., Potakhin M. S., Bogdanova M. S., Gatal'skaya E. V., Zdorovennov R. E., Ryabinkina A. V., Kukharev V. I., Myasnikova N. A., Subetto D. A. Accumulation of sedimentary matter at the present stage of lymnogenesis development in the territory of the southeastern part of the Fennoscandian crystal shield using the example of Lake Vendyurskoye. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Vestnik of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2025;70(1):30–51. (In Russ.). doi: 10.21638/spbu07.2025.102

Fomina Yu. Yu., Syarki M. T., Slastina Yu. L. Assessment of the ecological state of Lake Munozero (Lake Onega basin) based on plankton indicators. *Byulleten' MOIP. Otd. biol. = Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Biol. Department*. 2022;127(2):37–50. (In Russ.)

Jansen J., Simpson G. L., Weyhenmeyer G. A., Härkönen L. H., Paterson A. M., del Giorgio P. A., Prairie Y. T. Climate-driven deoxygenation of northern lakes. *Nat. Clim. Change*. 2024;14(8):832–838. doi: 10.1038/s41558-024-02058-3

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia: a reference book. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 p. (In Russ.)

Makarova E. M. Bacterioplankton of the north-western reach of Lake Munozero (Republic of Karelia). *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya = Aquatic Biore-sources and Habitat*. 2019;2:57–65. (In Russ.). doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_2_57

Makarova E. M. Structural and functional indicators of bacterioplankton of the south stretch of Lake Munozero (Karelia). *Vestnik NVGU = Bulletin of NSU*. 2020;2: 19–25. (In Russ.). doi: 10.36906/2311-4444/20-2/03

Makarova E. M., Zdorovenнова G. E., Ikko O. I., Zdorovennov R. E., Mitrokhov A. V., Syarki M. T., Sabylina A. V., Novikova Yu. S., Sidorova A. I., Kalinkina N. M., Slastina Yu. L., Pal'shin N. I. The state and habitat conditions of the plankton community of small lakes in Karelia. Database RU 2025624656. Registration date: 20.10.2025. Publication date: 23.10.2025. (In Russ.)

Nazarova L. E., Isakova K. V., Kalinkina N. M., Bala-gansky A. F. The climate warming influence on the Shuya River winter runoff and the consequences for the zoobenthos of Lake Onego. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2022;154(1):28–36. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869607122010086

Paerl H. W., Huisman J. Blooms like it hot. *Science*. 2008;320:57–58. doi: 10.1126/science.1155398

'Respublika' – an information and analytical portal of Karelia. (In Russ.). Website. URL: <https://rk.karelia.ru/accident/forel-nachala-gibnut-iz-za-zhary-v-neskolkih-hozyajstvah-karelii/> (accessed: 18.03.2026).

Sabylina A. V., Ikko O. I. Changes in the chemical composition of Lake Munozero (Karelia) water over the past 60 years. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;9:76–90. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1046

Sabylina A. V., Efremova T. A., Ikko O. I. Chemical composition of the hydro-cryogenic system of Lakes Munozero and Urozero (Republic of Karelia, Russia). *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2020;60(4):592–600. (In Russ.). doi: 10.31857/S2076673420040063

Sidorova A. I., Georgiev A. P. Current state of macrozoobenthos in Lake Munozero. *Transformatsiya ehko-sistem = Ecosystem Transformation*. 2024;7(4):174–186. (In Russ.). doi: 10.23859/estr-230124

Smirnova V. S., Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Chernova E. N. Phytoplankton state and cyanotoxins in the Lake Svyatozero bloom spot (Lake Onega basin, Russia). *Voda i ehkologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2021;1(85):50–60. (In Russ.). doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60

Zdorovenнова G. E., Zdorovennov R. E., Novikova Yu. S., Efremova T. V. Thermal and ice regimes in Petrozavodsk Bay of Lake Onego in 2023–2024 based on data of measurements at an autonomous station. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025;6: 27–38. (In Russ.). doi: 10.17076/lim2114

Поступила в редакцию / received: 19.03.2026; принята к публикации / accepted: 05.06.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Здорovenнов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Здорovenнова Галина Эдуардовна

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: zdorovennova@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Zdorovennova, Galina

Cand. Sci. (Geog.), Leading Researcher

УДК 556.555.4

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО И ЛЕДОВОГО РЕЖИМОВ ЗАЛИВОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Т. В. Ефремова^{1*}, Т. Г. Кравченкова², Н. И. Пальшин¹

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. Александра Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*efremova@nwpi.krc.karelia.ru

² Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды –
филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (наб. Варкауса, 3, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185031)

На основании анализа наблюдений Карельского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) за 1953–2024 гг. в Петрозаводской, Кондопожской и Большой губе Повенецкого залива Онежского озера выявлены особенности реакции ледовой фенологии и температуры поверхностного слоя воды в прибрежной зоне на изменения климата. Анализ данных наблюдений за температурой воздуха свидетельствует о сохраняющемся устойчивом потеплении регионального климата в бассейне озера во все сезоны года. Установлены статистически значимые тренды смещения дат начала ледостава на более поздние сроки со скоростью +2,3–3,0 сут/10 лет, а дат окончания ледостава на более ранние со скоростью –1,9–2,6 сут/10 лет. Продолжительность ледостава во всех заливах сократилась на 35 суток. Проанализированы особенности изменения температуры поверхностного слоя воды в заливах. Определено, что за 70-летний период линейный тренд средней температуры воды в июне–октябре составил в Петрозаводской губе 0,34 °C/10 лет, в Кондопожской – 0,47 °C/10 лет и в Большой губе – 0,37 °C/10 лет. В результате роста температуры поверхностного слоя воды период прямой стратификации (температура воды > 4 °C) увеличился в заливах на 20–30 суток, а продолжительность периода с температурой воды > 10 °C («биологическое лето») – на 30–40 суток.

Ключевые слова: Онежское озеро; термический режим; изменение климата; ледовая фенология; температура воды

Для цитирования: Ефремова Т. В., Кравченкова Т. Г., Пальшин Н. И. Особенности термического и ледового режимов заливов Онежского озера по данным многолетних наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 29–40. doi: 10.17076/lim2396

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (FMEN 2026-0011, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

T. V. Efremova^{1*}, T. G. Kravchenkova², N. I. Palshin¹. FEATURES OF THE THERMAL AND ICE REGIME OF LAKE ONEGO BAYS BASED ON LONG-TERM OBSERVATIONS

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *efremova@nwpi.krc.karelia.ru

²Karelian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – branch of the Northwestern Hydrometeorology and Environmental Monitoring Administration (3 Varkaus St., 185031 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

An analysis of the observations carried out by the Karelian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (CHM) in 1953–2024 in the Petrozavodsk, Kondopozhskaya, and Bolshaya Bays of the Gulf of Povenets, Lake Onego, revealed patterns in the response of ice phenology and surface water temperature in the inshore zone to climate change. The analysis of air temperature data indicates persistent, stable warming of the regional climate in the lake basin throughout the year. It was found that there was a statistically significant trend in the ice-on dates of all lakes toward later dates at a rate of +2.3–3.0 days/10 years, and the ice-off dates toward earlier dates at a rate of –1.9–2.6 days/10 years. The ice duration has decreased by 35 days. Patterns of surface water temperature changes in the bays were analyzed. It was determined that the 70-year linear trend of the average water temperature in June–October was 0.34 °C/10 years in Petrozavodsk Bay, 0.47 °C/10 years in Kondopozhskaya Bay, and 0.37 °C/10 years in Bolshaya Bay. As a result of the increase in the temperature of the surface layer of water, the stratification period (water temperature of > 4 °C) in the bays increased by 20–30 days, and the duration of the period with water temperatures > 10 °C (“biological summer”) increased by 30–40 days.

Keywords: Lake Onego; thermal regime; climate change; ice phenology; water temperature

For citation: Efremova T. V., Kravchenkova T. G., Palshin N. I. Features of the thermal and ice regime of Lake Onego bays based on long-term observations. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 29–40. doi: 10.17076/lim2396

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment (FMEN 2026-0011) to the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS.

Введение

В связи глобальным потеплением климата особый интерес вызывает реакция экосистем водоемов на происходящие климатические изменения. Одно из решающих воздействий на функционирование озерных экосистем оказывают изменения ледового и термического режимов. Многочисленные исследования ледовой фенологии озер в Северном полушарии показали, что сроки замерзания озер сместились к более поздним датам, а сроки разрушения льда – к более ранним, и следовательно, к меньшей продолжительности ледостава [Magnuson et al., 2000; Benson et al., 2012; Sharma et al., 2021; Basu et al., 2024], при этом растет температура поверхностного слоя воды озер [Schneider, Hook, 2010; O'Reilly et al., 2015; Ефремова и др., 2016; Woolway et al., 2020]. Наиболее быстрые темпы повышения температуры

воды наблюдаются в крупных глубоководных озерах Европейского Севера и Северной Америки [O'Reilly et al., 2015; Woolway, Merchant, 2017].

В последние десятилетия широко используются данные спутниковых наблюдений температуры поверхности воды, но, как правило, эти данные характеризуют температуру воды в центре водоема, что может не отражать темпы потепления в других районах крупного озера [Woolway, Merchant, 2018]. Онежское озеро – второй по величине глубоководный водоем Европы, котловина которого отличается крайне сложным строением: глубоководным центральным плесом и сильно изрезанной береговой линией с многочисленными заливами и губами. В настоящее время накоплены данные многолетних натурных наблюдений в заливах озера, которые помогут оценить изменения термических характеристик за длительные периоды

и улучшить наше понимание пространственной реакции на изменения климата в большой озерной системе Онежского озера.

Изменения многолетних натуральных наблюдений ледовых характеристик и температуры поверхности воды Онежского озера рассматривались в ряде публикаций на примере Петрозаводской губы [Крупнейшие..., 2015; Filatov et al., 2019; Диагноз..., 2020; Ефремова и др., 2026]. В данной работе для оценки особенностей изменчивости ледово-термических характеристик на акватории озера кроме Петрозаводской губы мы впервые используем данные наблюдений в Кондопожской губе и Большой губе Повенецкого залива Онежского озера за 70-летний период (1953–2024 гг.). Цель работы – статистический анализ изменений в долгосрочных временных рядах температуры воздуха, ледовой фенологии и температуры поверхности воды в трех заливах Онежского озера.

Материалы и методы

В настоящем исследовании характеристика термического и ледового режимов Петрозаводской, Кондопожской и Большой губы Повенецкого залива Онежского озера основана на статистической обработке и анализе данных многолетних регулярных наблюдений гидрологических постов Карельского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) за 1953–2024 гг. За начало периода исследований был принят 1953 год, когда в результате строительства Верхне-Свирской гидроэлектростанции Онежское озеро стало водохранилищем.

В статистическом анализе для характеристики ледового режима использовались визуально определяемые наблюдателем гидрологического поста даты начала и окончания ледостава в заливах. Датой начала ледостава считается первый день, когда озеро в поле зрения наблюдательного пункта было покрыто устойчивым неподвижным льдом (продолжительностью не менее 20 суток). Окончанию ледостава соответствует дата, предшествующая первой дате появления ледяных полей, битого льда, дрейфа льда под действием ветра. Для характеристики изменений температуры поверхности воды использовались осредненные за декаду многолетние данные ежедневных измерений температуры воды у берега на гидрологических постах в исследуемых заливах. Даты перехода температуры воды весной и осенью через 4 °C (начало и окончание периода, когда возможно формирование прямой термической стратификации) и через 10 °C

(так называемое «биологическое лето») определялись как даты устойчивого перехода измеренных срочных значений температуры воды через указанные пределы. Для оценки влияния температуры воздуха на ледовую фенологию и температуру поверхности воды использовались данные наблюдений метеостанций (МС) в городах Петрозаводск для Петрозаводской губы, Кондопога для Кондопожской губы и Медвежьегорск для Большой губы Повенецкого залива (рис. 1).

Для анализа трендов при обработке натуральных данных временных рядов применялся метод линейной регрессии. Уровень статистической значимости трендов оценивали на основе t -статистики Стьюдента. Для оценки статистической значимости трендов использовался 5%-й уровень ($p < 0,05$).

Петрозаводская губа расположена в западной части Онежского озера (рис. 1), площадь зеркала 73 км², средняя глубина 16 м, максимальная глубина 30 м. Кондопожская губа имеет площадь зеркала 225 км², среднюю глубину 21 м, максимальную глубину 75 м. Большая губа Повенецкого залива находится в самой северной части озера, площадь ее зеркала 117 км², средняя глубина – 32 м, максимальная – 94 м.

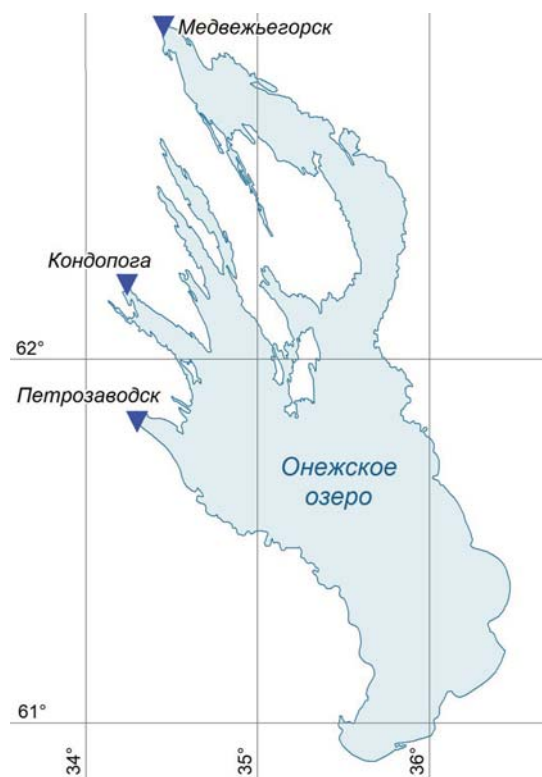


Рис. 1. Расположение гидрологических постов в заливах Онежского озера

Fig. 1. Location of hydrological observation posts in the bays of Lake Onega

Воды этих заливов испытывают наибольшую антропогенную нагрузку от промышленных центров – городов Петрозаводск, Кондопога и Медвежьегорск [Крупнейшие..., 2015].

Результаты и обсуждение

Температура воздуха

Температура воздуха признана наиболее важным климатическим фактором изменений термического режима озер. Изменения средней годовой температуры воздуха на метеостанциях Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск за рассматриваемый период наблюдений (1953–2024 гг.) почти синхронны (рис. 2).

Наименьшие значения температуры воздуха регистрируются на самой северной МС в Медвежьегорске, особенно в зимний период; в Петрозаводске и Кондопоге разница среднемесячных и среднегодовых температур минимальна. Согласно современной климатической норме (1991–2020 гг.) среднегодовая температура воздуха составила 3,6 °С на МС Петрозаводск, 3,7 °С на МС Кондопога и 2,9 °С на МС Медвежьегорск [Гидрометцентр..., 2026]. По сравнению с предыдущей климатической нормой (1961–1990 гг.) среднегодовая температура воздуха выросла на рассматриваемых метеостанциях на 1,1–1,4 °С. Потепление отмечается во все сезоны и все месяцы года. Наибольшие изменения отмечены в зимние месяцы: в среднем на 2,3–2,6 °С, в январе – на 3,1–3,3 °С.

Наименьшее увеличение температуры воздуха зарегистрировано в июне и октябре – на 0,6 °С. В остальные месяцы года увеличение температуры воздуха составило ~ 1 °С.

Анализ линейных трендов среднегодовой, сезонной и месячной температуры воздуха на метеостанциях выполнен за периоды 1953–2024 и 1976–2024 гг. Первая половина срока (1953–1976 гг.) – тенденции потепления в озерах не обнаружены, с 1976 года – фаза значительного роста температуры воздуха. 1976 год принят Росгидрометом за год начала современного потепления глобальной температуры воздуха [Доклад..., 2026]. Для всех пунктов наблюдений линейные тренды температуры воздуха положительны, значимы и составляют для среднегодовой температуры за период 1953–2024 гг. 0,32–0,35 °С/10 лет, а за период 1976–2024 гг. 0,56–0,63 °С/10 лет (скорости потепления увеличиваются приблизительно в два раза) (табл. 1). Наибольшая скорость роста отмечена на МС в Медвежьегорске, наименьшая – на МС в Петрозаводске.

Во внутригодовом ходе изменение сезонных значений температуры воздуха происходило неравномерно: наибольшая скорость потепления за весь 70-летний период наблюдалась зимой (0,42–0,50 °С/10 лет) и весной (0,35–0,41 °С/10 лет), наименьшая – летом (0,24–0,28 °С/10 лет) и осенью (0,26–0,27 °С/10 лет).

Анализ трендов временных рядов с 1976 г. показал наибольшую скорость потепления зимой (0,80–0,93 °С/10 лет), причем максимальные темпы потепления наблюдались в декабре:

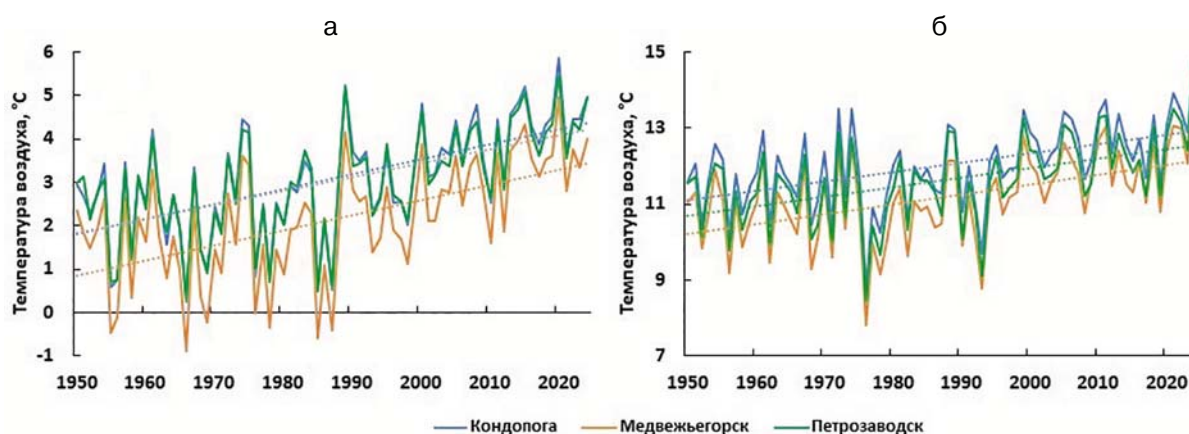


Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха (а); средняя температура воздуха за период открытой воды (июнь–октябрь) (б). Данные метеостанций Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск; прямые линии – линии трендов за период 1953–2024 гг.

Fig. 2. Average annual air temperature (a); average air temperature during the open water period (June–October) (b); data from the weather stations of Petrozavodsk, Kondopoga, and Medvezhyegorsk; straight lines – trend lines for the period 1953–2024

Таблица 1. Оценки линейных трендов скорости повышения температуры приземного воздуха (°C/10 лет) на МС Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск, осредненной по сезонам года за 1953–2024 и 1976–2024 гг. ($p < 0,01$)

Table 1. Assessment of linear trends in the rate of increase in surface air temperature (°C/10 years) at the weather stations of Petrozavodsk, Kondopoga, and Medvezhyegorsk, averaged over the seasons of the year for the periods 1953–2024 and 1976–2024 ($p < 0.01$)

Период Period	Петрозаводск Petrozavodsk		Кондопога Kondopoga		Медвежьегорск Medvezhyegorsk	
	1953–2024	1976–2024	1953–2024	1976–2024	1953–2024	1976–2024
зима winter	0,42	0,81	0,47	0,93	0,50	0,80
весна spring	0,35	0,36	0,40	0,41	0,41	0,42
лето summer	0,25	0,49	0,24	0,48	0,28	0,59
осень autumn	0,26	0,49	0,26	0,55	0,27	0,59
июнь–октябрь June–October	0,25	0,50	0,25	0,51	0,26	0,56
год year	0,32	0,56	0,34	0,60	0,35	0,63

0,86 °C/10 лет в Петрозаводске, 1,10 °C/10 лет в Кондопоге и Медвежьегорске. Летом и осенью отмечаются темпы потепления 0,48–0,59 °C/10 лет, а наименьшие темпы потепления характерны для весны (0,36–0,42 °C/10 лет). Особо выделен период с июня по октябрь, когда в заливах Онежского озера отсутствует лед. Скорость потепления в период открытой воды составила 0,50–0,56 °C/10 лет, с максимальными значениями в сентябре (0,66–0,72 °C/10 лет), что связано, вероятно, с рекордными температурами воздуха в сентябре 2023 и 2024 годов.

Ледовая фенология

Наблюдающийся в последние десятилетия рост температуры воздуха, особенно в зимний сезон, привел к изменению ледового режима озер Карелии: ледостав стал устанавливаться в более поздние сроки, заканчиваться в более ранние, а следовательно, сократилась его продолжительность [Ефремова и др., 2026]. Онежское озеро за исследуемый период ежегодно полностью покрывалось льдом, за исключением аномально мягкой зимы 2019/20 гг., когда максимально льдом было покрыто лишь 58,5 % площади озера [Калинкина и др., 2021].

Для установления статистических связей между температурой воздуха и сроками ледовой фенологии часто используются средние температуры за фиксированные календарные периоды [Ефремова, Пальшин, 2011]. Согласно нашим оценкам, дата замерзания во всех

заливах лучше всего коррелирует со средней температурой воздуха за ноябрь–декабрь (коэффициент корреляции $r = 0,80$ для Петрозаводской губы; для Кондопожской губы $r = 0,73$ и для Большой губы $r = 0,76$). Даты окончания ледостава коррелируют со средней температурой воздуха за апрель в Кондопожской ($r = -0,72$) и Большой ($r = -0,74$) губах и со средней температурой воздуха за март–апрель в Петрозаводской губе ($r = -0,67$).

Средняя дата начала ледостава в 1991–2020 гг. в Кондопожской губе – 8 декабря, в Большой губе – 22 декабря, в Петрозаводской губе – 26 декабря. По сравнению с предыдущим тридцатилетием дата начала ледостава сместилась на 10 суток к более поздней. За весь период наблюдений (1953–2024 гг.) в исследуемых заливах самая ранняя дата установления ледостава в Кондопожской губе – 10 ноября 1993 г., в Петрозаводской губе – 18 ноября 1993 г., в Большой губе Повенецкого залива – 24 ноября 1993 г. Самая поздняя дата начала ледостава в Кондопожской губе – 9 января зимой 2011/12 гг., в Петрозаводской губе – 31 января зимой 2019/20 гг. и в Большой губе – 28 января зимой 2019/20 гг. Таким образом, сроки начала ледостава во всех заливах отличаются на два месяца (рис. 3, а). Самое раннее начало ледостава среди трех заливов наблюдается в Кондопожской губе. Это связано с тем, что пост наблюдений находится в вершинной мелководной части губы, сама же губа изолирована от основного плеса озера Шардонскими островами, препятствующими водообмену,

а, например, для Петрозаводской губы характерен более интенсивный водообмен с центральной акваторией озера [Ефремова, Пальшин, 1989]. Большая губа Повенецкого залива – самый северный залив Онежского озера – замерзает на две недели позже Кондопожской губы. Причина в том, что это самый глубоководный залив, которому требуется больше времени для охлаждения осенью и, соответственно, большая сумма зимних отрицательных температур для образования ледяного покрова [Ресурсы..., 1972].

Сроки окончания ледостава в заливах показывают более высокую степень когерентности по сравнению со сроками его начала (рис. 3, б). В базовый период (1991–2020 гг.) средняя дата окончания ледостава в Петрозаводской и Кондопожской губах наблюдалась 27 апреля, в Большой губе Повенецкого залива – 5 мая. Современная норма по сравнению с предыдущей изменилась к более ранней на 5 суток в Большой губе, на 7 суток в Петрозаводской и Кондопожской губах. Самая ранняя дата окончания ледостава наблюдалась в Петрозаводской губе – 13 марта 2020 г., в Кондопожской губе – 2 апреля 2020 г., в Большой губе – 19 апреля 2013 г. Самая поздняя дата окончания

ледостава в Кондопожской губе – 17 мая 1956 г., в Петрозаводской губе – 19 мая 1956 г., в Большой губе – 30 мая 1956 г. Продолжительность ледостава в Большой губе изменялась от 85 суток зимой 2019/20 гг. до 181 суток зимой 1955/56 гг., в Кондопожской губе – от 95 суток зимой 2019/20 гг. до 180 суток зимой 1973/74 гг., в Петрозаводской губе – от 43 суток зимой 2019/20 гг. до 170 суток зимой 1973/74 гг. За период 1991–2020 гг. средняя продолжительность ледостава составила 123 суток в Петрозаводской губе, 135 суток в Большой губе и 141 сутки в Кондопожской губе.

Выполненный регрессионный анализ временных рядов ледовых событий в заливах Онежского озера показал, что за весь исследуемый период (1953–2024 гг.) сроки начала ледостава смещались к более поздним датам со скоростью +2,3–3,0 сут/10 лет (табл. 2). Окончание ледостава в заливах стало происходить раньше со скоростью –1,9–2,6 сут/10 лет. В результате более позднего замерзания и более раннего окончания продолжительность ледостава за период 1953–2024 гг. сокращалась со скоростью –4,9–5,1 сут/10 лет, а за период 1976–2024 гг. – со скоростью –6,8–8,0 сут/10 лет. Полученные нами оценки

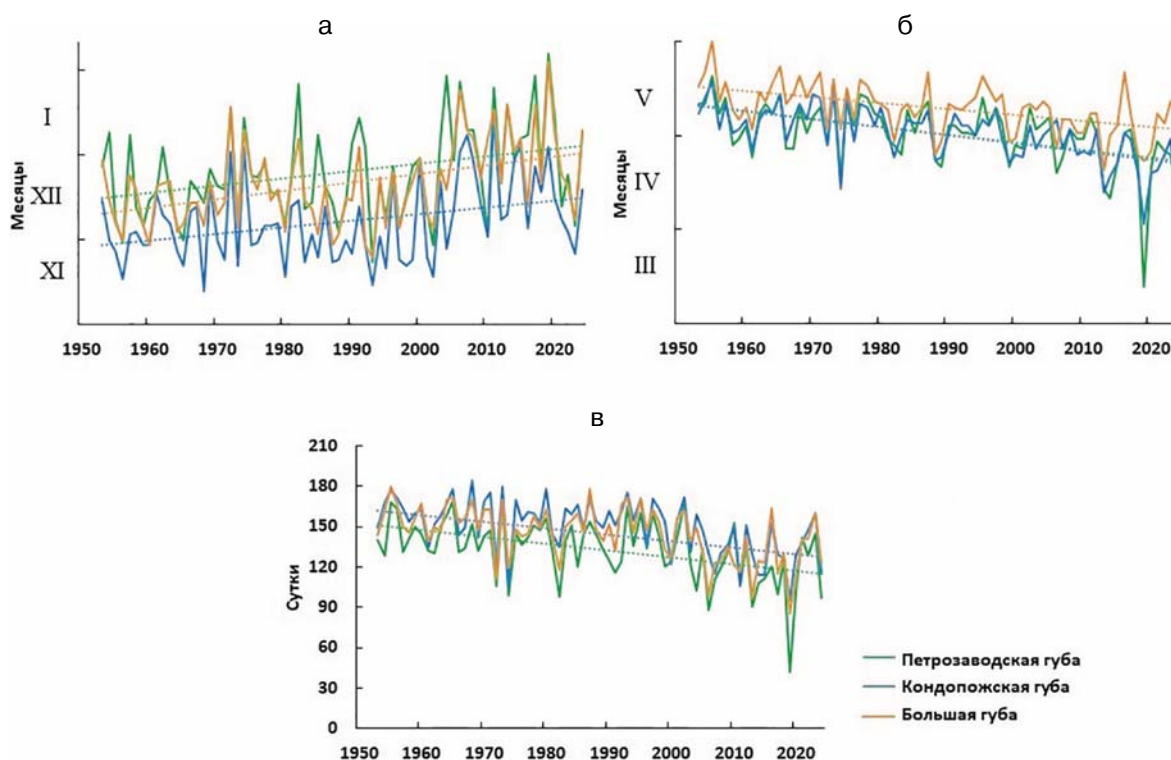


Рис. 3. Межгодовая изменчивость сроков начала ледостава (а), его окончания (б) и продолжительности (в) в Петрозаводской, Кондопожской и Большой губе

Fig. 3. Interannual variability of ice freezing (а), ice breaking (б) and the ice duration (в) in Petrozavodsk, Kondopoga and Bolshaya Guba Bays

Таблица 2. Оценки линейного тренда временных рядов дат начала, окончания и продолжительности ледостава за 1953–2024 и 1976–2024 гг. в заливах Онежского озера

Table 2. Assessment of the linear trend of ice freezing (ice-on) and breaking (ice-off) dates, and the ice duration for the periods 1953–2024 and 1976–2024 in the bays of Lake Onego

Название Name	Ледовый режим Ice regime	1953–2024			1976–2024		
		b	r ²	p	b	r ²	p
Большая губа Bolshaya Guba Bay	Начало ледостава Ice-on	+3,027	0,182	0,0002	+5,085	0,217	0,0008
	Окончание ледостава Ice-off	–1,896	0,255	0,0000	–1,759	0,119	0,0150
	Продолжительность ледостава Ice duration	–4,923	0,261	0,0000	–6,844	0,232	0,0005
Кондопожская губа Kondopoga Bay	Начало ледостава Ice-on	+2,311	0,113	0,0139	+4,551	0,188	0,0018
	Окончание ледостава Ice-off	–2,603	0,385	0,0000	–3,490	0,377	0,0000
	Продолжительность ледостава Ice duration	–4,915	0,259	0,0000	–8,041	0,341	0,0000
Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	Начало ледостава Ice-on	+2,603	0,109	0,0047	+3,797	0,097	0,0297
	Окончание ледостава Ice-off	–2,469	0,253	0,0000	–3,784	0,266	0,0002
	Продолжительность ледостава Ice duration	–5,072	0,216	0,0000	–7,581	0,209	0,0009

Примечание. b – коэффициент линейного тренда (сутки/10 лет), r² – вклад тренда в дисперсию, p – уровень значимости.
Note. b is the linear trend coefficient (days/10 years), r² is the contribution of the trend to the variance, p is the significance level.

для заливов крупного северного озера согласуются с данными 2499 озер Северного полушария, для которых определена скорость сокращения ледостава в среднем на 9 суток за 10 лет за 1971–2020 гг. [Basu et al., 2024].

Для заливов Онежского озера за 70-летний период продолжительность ледостава сократилась на 35 суток, причем более позднее замерзание озер вносило больший вклад в сокращение ледостава по сравнению с более ранним очищением озер ото льда.

Температура поверхности воды

Как показано выше, рост температуры воздуха в осенние, зимние и весенние месяцы приводит к более ранним срокам окончания ледостава и очищения ото льда заливов Онежского озера. Потепление может приводить также к более ранним датам установления прямых термических стратификаций и большей устойчивости водной толщи, что способствует значительному нагреванию эпилимниона в течение летних месяцев [Woolway et al., 2020]. На многолетнюю изменчивость температуры поверхностного слоя воды в первую очередь

влияют межгодовые колебания приземной температуры воздуха. Коэффициенты корреляции среднемесячных значений температуры воздуха и температуры поверхностного слоя воды у берега на гидрологических постах каждого залива за июнь–октябрь в 1953–2024 гг. равны 0,87–0,89.

Поскольку в Повенецком заливе позже сходит лед, весенний термобар в Большой губе проходит в более поздние сроки. Согласно нашим оценкам, переход температуры воды через 4 °С весной на гидрологических постах в базовый период 1991–2020 гг. в среднем наблюдался в Кондопожской губе 7 мая, в Петрозаводской губе – 10 мая, в Большой губе – 18 мая. Заканчивался период прямой термической стратификации в трех заливах в близкие даты: 10 ноября в Петрозаводской губе, 11 ноября в Кондопожской губе и 15 ноября в Большой губе. На рис. 4 (а) представлены графики межгодовой изменчивости продолжительности периода с температурой > 4 °С в заливах за 1953–2024 гг. Линейный тренд составил +2,9 сут/10 лет в Петрозаводской губе, +4,1 сут/10 лет в Кондопожской губе и +2,8 сут/10 лет в Большой губе (p < 0,01).

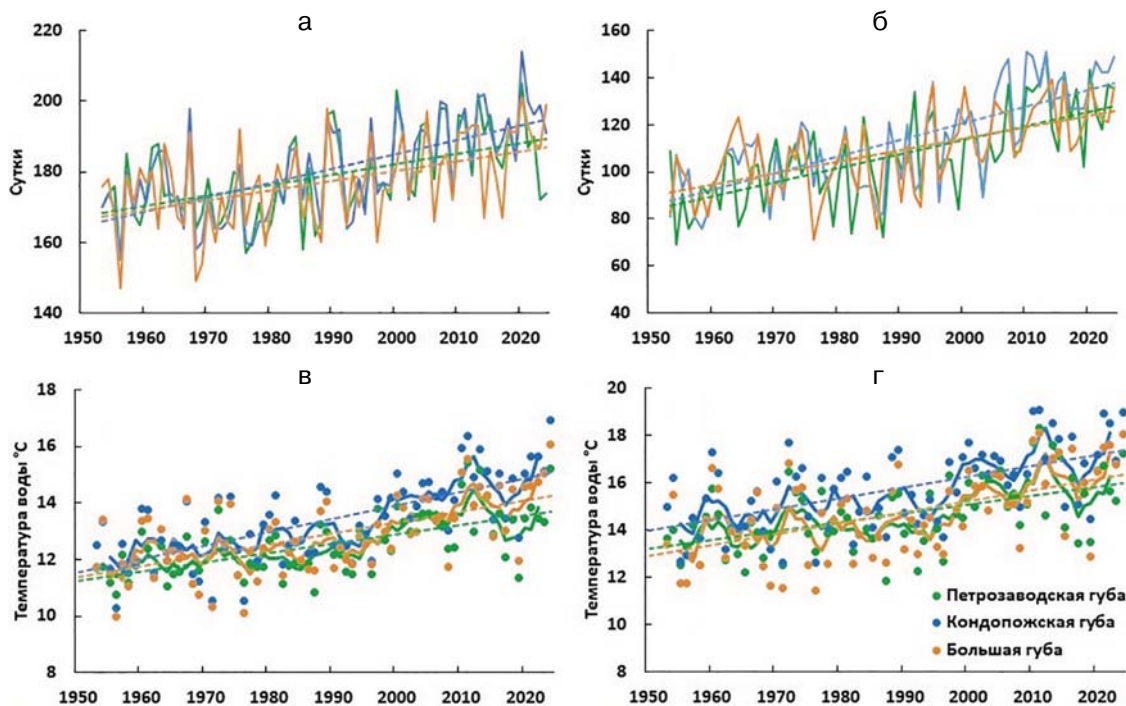


Рис. 4. Продолжительность периода с температурой воды $> 4^{\circ}\text{C}$ (а); продолжительность «биологического лета» (б); средняя температура поверхности воды за июнь–октябрь (в); средняя за июнь–август температура поверхности воды (г) в Петрозаводской, Кондопожской и Большой губе. 5-летние скользящие средние значения температуры воды, прямые линии – линии трендов за период 1953–2024 гг.

Fig. 4. Duration of the period with water temperature $> 4^{\circ}\text{C}$ (a); duration of the 'biological summer' (б); average water surface temperature for June–August (в); average water surface temperature for June–October (г) in Petrozavodsk, Kondopoga and Bolshaya Guba Bays. 5-year moving average water temperatures, straight lines – trend lines for the period 1953–2024

Следовательно, за 70 лет наблюдений продолжительность периода с прямой термической стратификацией в заливах увеличилась на 20–30 суток.

Переход температуры воды через 10°C в 1991–2020 гг. летом наблюдался в среднем 5 июня в Петрозаводской губе, 6 июня в Кондопожской и 11 июня в Большой губе, осенью – 30 сентября в Петрозаводской губе, 8 октября в Кондопожской и 7 октября в Большой губе. Скорость роста продолжительности «биологического лета» (наиболее благоприятный период для развития гидробионтов) составила $+5,9$ сут/10 лет в Петрозаводской губе, $+7,0$ сут/10 лет в Кондопожской и $+4,9$ сут/10 лет в Большой губе (рис. 4, б). Таким образом, за исследуемые годы продолжительность периода с температурой воды $> 10^{\circ}\text{C}$ увеличилась на 30–40 суток ($p < 0,01$). Большие скорости увеличения периодов стратификации и продолжительности «биологического лета» в Кондопожской губе по сравнению с другими заливами Онежского озера обусловлены, скорее всего, мелководностью и большей изолированностью от открытого плеса озера.

На рис. 4 (в, г) приведены данные усредненных с июня по октябрь значений температуры поверхности воды и средние летние значения температуры воды, 5-летние скользящие средние и линейные тренды для трех заливов Онежского озера. Наибольшая температура воды характерна для гидрологического поста в Кондопожской губе. Меньшие значения температуры воды в более южной Петрозаводской губе по сравнению с Кондопожской губой можно объяснить ее большей открытостью и активным водообменом с глубоководной акваторией озера.

Анализ долгосрочных изменений в заливах температуры поверхности воды показал повышение в течение каждого календарного месяца с июня по октябрь (табл. 3). В 1953–2024 гг. скорость повышения средней температуры поверхности воды за июнь–октябрь составила от $0,34^{\circ}\text{C}/10$ лет в Петрозаводской губе до $0,47^{\circ}\text{C}/10$ лет в Кондопожской губе (табл. 3), что привело к ее росту на $2,4$ – $3,2^{\circ}\text{C}$ за 70-летний период. За летний сезон (июнь–август) темпы роста температуры составляли от $0,37^{\circ}\text{C}/10$ лет в Петрозаводской губе до $0,46^{\circ}\text{C}/10$ лет в Кондопожской губе.

Таблица 3. Коэффициенты линейного тренда температуры поверхностного слоя воды (°C/10 лет) за отдельные месяцы 1976–2024 гг. и осредненные за июнь–август и июнь–октябрь в период 1953–2024 и 1976–2024 гг. Уровень значимости $p < 0,01$

Table 3. Coefficients of the linear trend of surface water temperature (°C/10 years) for several months of the period 1976–2024 and averaged for June–August and June–October for the periods 1953–2024 and 1976–2024. Significance level is $p < 0.01$

Название Name	VI	VII	VIII	IX	X	VI–VIII		VI–X	
						1953–2024	1976–2024	1953–2024	1976–2024
Большая губа Bolshaya Guba Bay	0,84	0,76	0,65	0,56	0,34	0,45	0,75	0,37	0,63
Кондопожская губа Kondopoga Bay	0,65	0,66	0,65	0,75	0,62	0,46	0,66	0,47	0,67
Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	0,64	0,62	0,32	0,49	0,29	0,37	0,53	0,34	0,47

В 1976–2024 гг. темпы роста температуры поверхности воды были больше, чем в среднем за 70-летний период, и достигали в июне–октябре 0,47–0,67 °C/10 лет, а за летний сезон – 0,53–0,75 °C/10 лет. Наиболее быстрый рост средней температуры поверхностного слоя воды с 1976 года происходил в Большой губе Онежского озера как в летние месяцы, так и в июне–октябре, что можно связать с наибольшей скоростью роста температуры воздуха в этом районе в весенние, летние и осенние месяцы (см. табл. 1).

Температура поверхности воды в результате воздействия климатических факторов повышается в озерах разных регионов мира. В среднем рост температуры поверхностного слоя воды летом в 235 озерах мира за период 1985–2009 гг. происходил со скоростью 0,34 °C/10 лет [O'Reilly et al., 2015]. Однако тенденции потепления поверхностных вод разных озер могут быть весьма изменчивыми. Например, тренд температуры поверхности воды озера Байкал за 1970–2016 гг. варьирует от 0,11 до 0,69 °C/10 лет на 17 станциях в разных районах этого озера, при среднем значении по всем станциям 0,45 °C/10 лет [Шимараев, Троицкая, 2018]. В Рыбинском водохранилище за 1976–2019 гг. выявлена тенденция повышения средней за май–октябрь температуры воды со скоростью 0,72 °C/10 лет [Законнова, 2021]. Для озера Центральной Финляндии Каллавеси средняя скорость потепления в 1964–2020 гг. составила 0,42 °C/10 лет [Noori et al., 2022].

Заключение

Проведенный анализ данных наблюдений приземной температуры воздуха трех метеостанций Карелии за 1953–2024 гг. позволяет сделать вывод о сохраняющемся устойчивом

потеплении регионального климата на побережье Онежского озера во все сезоны года, с наиболее выраженным потеплением в зимний сезон. В результате за 70-летний период продолжительность ледостава в заливах Онежского озера сократилась на 35 суток. Средняя температура поверхности воды за июнь–октябрь в заливах увеличилась на 2,4–3,2 °C. Продолжительность периода с температурой воды > 4 °C увеличилась на 20–30 суток, а продолжительность периода с температурой > 10 °C – на 30–40 суток.

Анализ данных наблюдений на гидрологических постах показал, что различия в ледовой фенологии, продолжительности летней стратификации, «биологического лета» и температуре поверхности воды в губах обусловлены не только зональными факторами, но и морфометрическими особенностями заливов и расположением постов наблюдений. Пост наблюдений в Кондопожской губе находится в ее вершине в мелководном месте, что может быть причиной более раннего начала ледостава и наибольшей его продолжительности по сравнению с другими заливами. Также для Кондопожской губы отмечены наиболее высокие значения температуры поверхности воды и наибольшая продолжительность «биологического лета», что может быть связано как с расположением гидрологического поста, так и с особенностями водообмена этого залива с открытым плесом озера.

Отличительная черта Петрозаводской губы – активный водообмен с центральным плесом Онежского озера; в ней наблюдается самое позднее начало ледостава и наименьшая его продолжительность. Большая губа Повенецкого залива – самый северный залив с наибольшими глубинами. Ледостав в ней начинается на несколько суток раньше, чем в Петрозаводской губе, а заканчивается примерно на неделю позже.

Несмотря на существенные морфометрические различия этих заливов, в них отмечаются близкие значения температуры поверхности воды и продолжительности «биологического лета».

Литература

Гидрометцентр России [Электронный ресурс]. URL: <https://meteoinfo.ru/climatecities> (дата обращения: 21.04.2026).

Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2025 год. м., 2026. 129 с.

Ефремова Т. В., Белашев Б. З., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Богданов С. Р., Здоровеннов Р. Э. Ледовая фенология разнотипных озер Карелии по данным многолетних наблюдений (1950–2021) // Лед и Снег. 2026. Т. 66, № 1. С. 105–120. doi: 10.7868/S2412376526010087

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Белашев Б. З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 228–238. doi: 10.7868/S0321059616020024

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Оценка водообмена Петрозаводской губы с Онежским озером // Исследование водных ресурсов Карелии / Ред. В. А. Фрейндлинг. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1989. С. 21–25.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Сроки ледовых явлений на водоемах Северо-Запада России // Метеорология и гидрология. 2011. Т. 36, № 8. С. 89–98.

Законнова А. В. Климатические изменения термического режима Рыбинского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2021. № 94(97). С. 7–16. doi: 10.47021/0320-3557-2021-94-7-16

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 6. С. 888–899. doi: 10.31857/S2587556621060078

Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Ресурсы поверхностных вод. Карелия и Северо-Запад / Сост. В. Ф. Гашева и др.; под ред. В. Е. Водогрецкого. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Т. 2. Ч. 1. 525 с.

Шимараев М. Н., Троицкая Е. С. Тенденции изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала в современный период // География и природные ресурсы. 2018.

№ 4. С. 95–104. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4 (95–104)

Basu A., Culpepper J., Blagrove K., Sharma S. Phenological shifts in lake ice cover across the Northern hemisphere: a glimpse into the past, present, and the future of lake ice phenology // Water Resour. Res. 2024. Vol. 60. e2023WR036392. doi: 10.1029/2023WR036392

Benson B. J., Magnuson J. J., Jensen O. P., Card V. M., Hodgkins G., Korhonen J., Livingstone D. M., Stewart K. M., Weyhenmeyer G. A., Granin N. G. Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855–2005) // Clim. Change. 2012. Vol. 112. P. 299–323. doi: 10.1007/s10584-011-0212-8

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impact on the watersheds of lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // Inland Waters. 2019. Vol. 9, no. 2. P. 130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Magnuson J. J., Robertson D. M., Benson B. J., Wynne R. H., Livingstone D. M., Arai T., Assel R. A., Barry R. G., Card V., Kuusisto E., Granin N. G., Prowse T. D., Stewart K. M., Vuglinski V. S. Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere // Science. 2000. Vol. 289. P. 1743–1746. doi: 10.1126/science.289.5485.1743

Noori R., Bateni S. M., Saari M., Almazroui M., Torabi Haghighi A. Strong warming rates in the surface and bottom layers of a boreal lake: results from approximately six decades of measurements (1964–2020) // Earth and Space Science. 2022. Vol. 9(2). e2021EA001973. doi: 10.1029/2021EA001973

O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42, no. 24. P. 10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235

Schneider P., Hook S. J. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985 // Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37, no. 22. P. 208–217. doi: 10.1029/2010GL045059

Sharma S., Richardson D. C., Woolway R. I., Imrit M. A., Bouffard D., Blagrove K., Daly J., Filazzola A., Granin N., Korhonen J., Magnuson J., Marszelewski W., Matsuzaki S. S., Perry W., Robertson D. M., Rudstam L. G., Weyhenmeyer G. A., Yao H. Loss of ice cover, shifting phenology, and more extreme events in Northern Hemisphere lakes // Jour. Geophys. Res. Biogeosci. 2021. Vol. 126. e2021JG006348. doi: 10.1029/2021JG006348

Woolway R. I., Kraemer B. M., Lenters J. D., Merchant C. J., O'Reilly C. M., Sharma S. Global lake responses to climate change // Nat. Rev. Earth Environ. 2020. Vol. 1, no. 8. P. 388–403. doi: 10.1038/s43017-020-0067-5

Woolway R. I., Merchant C. J. Amplified surface temperature response of cold, deep lakes to inter-annual air temperature variability // Sci. Rep. 2017. Vol. 7, no. 1. P. 1–8. doi: 10.1038/s41598-017-04058-0

Woolway R. I., Merchant C. J. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: a study of large northern hemisphere lakes. J. Geophys. Res. Atmos. 2018. Vol. 123. P. 3087–3098. doi: 10.1002/2017JD027661

References

A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2025. Moscow; 2026. 129 p. (In Russ.)

Basu A., Culpepper J., Blagrove K., Sharma S. Phenological shifts in lake ice cover across the Northern hemisphere: a glimpse into the past, present, and the future of lake ice phenology. *Water Resour. Res.* 2024;60:e2023WR036392. doi: 10.1029/2023WR036392

Benson B. J., Magnuson J. J., Jensen O. P., Card V. M., Hodgkins G., Korhonen J., Livingstone D. M., Stewart K. M., Weyhenmeyer G. A., Granin N. G. Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855–2005). *Clim. Change.* 2012;112:299–323. doi: 10.1007/s10584-011-0212-8

Efremova T. V., Belashev B. Z., Pal'shin N. I., Zdorovenova G. E., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E. Ice phenology of different types of lakes in Karelia based on long-term observation data (1950–2021). *Led i Sneg = Ice and Snow.* 2026;66(1):105–120. (In Russ.). doi: 10.7868/S2412376526010087

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Assessment of water exchange between Petrozavodsk Bay and Lake Onego. *Issledovanie vodnykh resursov Karelii = Study of water resources of Karelia.* Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1989. P. 21–25. (In Russ.)

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Ice phenomena term on the water bodies of Northwestern Russia. *Meteorology and Hydrology.* 2011;36(8):559–565. doi: 10.3103/S1068373911080085

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Belashev B. Z. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011. *Water Resources.* 2016;43(2):402–411. doi: 10.1134/S0097807816020020

Filatov N. N. (ed.). Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 255 p. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). The largest reservoir lakes of the Northwest of European Russia: current state and ecosystem changes under climate and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Pal'shin N. Climate change impact on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters.* 2019;9(2):130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Gasheva V. F. et al. (comp.). Surface water resources. Karelia and the North-West. Vol. 2, pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1972. 525 p. (In Russ.)

Hydrometeorological Center of Russia. (In Russ.). URL: <https://meteoinfo.ru/climatcities> (accessed: 21.04.2026).

Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. Response of the Lake Onego

ecosystem to abnormally high air temperatures in the winter of 2019/2020 in the spring-summer period. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Ser.* 2021;85(6):888–899. (In Russ.). doi: 10.31857/S2587556621060078

Magnuson J. J., Robertson D. M., Benson B. J., Wynne R. H., Livingstone D. M., Arai T., Assel R. A., Barry R. G., Card V., Kuusisto E., Granin N. G., Prowse T. D., Stewart K. M., Vuglinski V. S. Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. *Science.* 2000;289:1743–1746. doi: 10.1126/science.289.5485.1743

Noori R., Bateni S. M., Saari M., Almazroui M., Torabi Haghighi A. Strong warming rates in the surface and bottom layers of a boreal lake: results from approximately six decades of measurements (1964–2020). *Earth and Space Science.* 2022;9(2):e2021EA001973. doi: 10.1029/2021EA001973

O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys. Res. Lett.* 2015;42(24):10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235

Schneider P., Hook S. J. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. *Geophys. Res. Lett.* 2010;37(22):208–217. doi: 10.1029/2010GL045059

Sharma S., Richardson D. C., Woolway R. I., Imrit M. A., Bouffard D., Blagrove K., Daly J., Filazzola A., Granin N., Korhonen J., Magnuson J., Marszelewski W., Matsuzaki S. S., Perry W., Robertson D. M., Rudstam L. G., Weyhenmeyer G. A., Yao H. Loss of ice cover, shifting phenology, and more extreme events in Northern Hemisphere lakes. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2021;126:e2021JG006348. doi: 10.1029/2021JG006348

Shimaraev M. N., Troitskaya E. S. Current trends in upper water layer temperature in coastal zones of Baikal. *Geography and Natural Resources.* 2018;39(4):349–357. doi: 10.1134/S187537281804008X

Woolway R. I., Kraemer B. M., Lenters J. D., Merchant C. J., O'Reilly C. M., Sharma S. Global lake responses to climate change. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020;1(8):388–403. doi: 10.1038/s43017-020-0067-5

Woolway R. I., Merchant C. J. Amplified surface temperature response of cold, deep lakes to inter-annual air temperature variability. *Sci. Rep.* 2017;7(1):1–8. doi: 10.1038/s41598-017-04058-0

Woolway R. I., Merchant C. J. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: a study of large northern hemisphere lakes. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2018;123:3087–3098. doi: 10.1002/2017JD027661

Zakonova A. V. Climatic changes in the thermal regime of the Rybinsk Reservoir. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod im. I. D. Papanina RAN = Proceedings of the I. D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences.* 2021;94(97):7–16. (In Russ.). doi: 10.47021/0320-3557-2021-94-7-16

Поступила в редакцию / received: 29.04.2026; принята к публикации / accepted: 17.08.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ефремова Татьяна Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Кравченкова Татьяна Георгиевна

начальник Карельского ЦГМС

e-mail: gidromet@onego.ru

Пальшин Николай Иннокентьевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: npalshin@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Efremova, Tatiana

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Kravchenkova, Tatyana

Head of the Karelian Center for Hydrometeorology
and Environmental Monitoring

Palshin, Nikolai

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

УДК 550.47

ПРОЦЕСС СУЛЬФАТРЕДУКЦИИ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ГИДРОГРАФИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ТАЕЖНЫХ ОЗЕР ВЕРХНЕЕ И НИЖНЕЕ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

К. В. Титова*, Н. М. Кокрятская, Т. А. Жибарева

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (пр-т Никольский, 20, Архангельск,
Россия, 163020), *ksyu_sev@mail.ru*

Обобщены результаты работ по изучению анаэробных процессов (на примере сульфатредукции) в донных отложениях двух связанных в систему малых борельных озер Архангельской области, одно из которых антропогенно нагружено, второе находится практически в естественном состоянии. Отмечено, что распределение реакционноспособного железа в воде и донных отложениях свидетельствует о развитии уже в поверхностных горизонтах донных отложений озера Нижнее восстановительных условий в результате создания в гипolimнионе анаэробных условий. Установлено, что наличие значительных количеств органического вещества в пелитовых илах исследуемых водоемов не является фактором, лимитирующим протекание процесса сульфатредукции, а приводит к накоплению соединений восстановленной серы – производных бактериального сероводорода в донных отложениях. На основании сравнительного анализа количественных параметров процесса сульфатредукции (концентраций соединений восстановленной серы, органического углерода и реакционноспособного железа) показано, что в озерах Верхнее и Нижнее содержание и соотношение форм восстановленной серы может выступать в качестве маркера антропогенного воздействия на водоем. Анализ полученных данных позволяет оценить экологическую обстановку в озере Нижнее как неблагоприятную, при этом в гидрографически связанном с ним озере Верхнее она в целом благоприятна.

Ключевые слова: малые озера; донные отложения; восстановленная сера; реакционноспособное железо; сульфатредукция

Для цитирования: Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А. Процесс сульфатредукции в донных отложениях гидрографически связанных таежных озер Верхнее и Нижнее (Архангельская область) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 41–57. doi: 10.17076/lim2305

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦКИА УрО РАН.

K. V. Titova*, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva. THE PROCESS OF SULFATE REDUCTION IN SEDIMENTS OF HYDROGRAPHICALLY CONNECTED BOREAL LAKES VERKHNEYE AND NIZHNEYE, ARKHANGELSK REGION

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

This paper summarizes the results of studies of anaerobic processes (specifically sulfate reduction) in the sediments of two interconnected small boreal lakes in the Arkhangelsk Region. One of these lakes is anthropogenically impacted, while the other is essentially in its natural state. It is noted that the distribution of reactive iron in the water and sediments indicates that reducing conditions occur even in the top layers of Lake Nizhneye's sediments as a result of anoxic conditions developing in the hypolimnion. The significant content of organic matter in the pelitic silts of the studied water bodies does not limit the sulfate reduction process, leading to the accumulation of reduced sulfur compounds – derivatives of bacterial hydrogen sulfide – in the sediments. A comparative analysis of the quantitative parameters of the sulfate reduction process (concentrations of reduced sulfur compounds, organic carbon, and reactive iron) showed that the content and ratio of reduced sulfur forms in Lakes Verkhneye and Nizhneye can serve as a marker of anthropogenic impact on the water body. Based on the obtained data, the environmental situation in Lake Nizhneye can be assessed as unfavorable, while the situation in Lake Verkhneye, which is hydrographically connected to the former, is generally favorable.

Keywords: small lakes; bottom sediments; reduced sulfur; reactive iron; sulfate reduction

For citation: Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A. The process of sulfate reduction in sediments of hydrographically connected boreal lakes Verkhneye and Nizhneye, Arkhangelsk Region. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 41–57. doi: 10.17076/lim2305

Funding. The study was implemented under state assignment to the Federal Center for Integrated Arctic Research UB RAS.

Введение

Одной из наиболее существенных экологических проблем в настоящее время является эвтрофирование различных водоемов при поступлении значительного количества соединений азота и фосфора в случае антропогенного влияния и естественных процессов. Избыток данных элементов может привести к активному развитию водорослей и цианобактерий, которые продуцируют токсичные вещества, являющиеся причиной гибели гидробионтов и даже отравления людей [Фрумин, Гильдеева, 2013; Анциферова и др., 2020; Heredia et al., 2022]. Особенно актуально это для небольших озер с их ограниченным самоочистительным потенциалом. Одним из отрицательных последствий эвтрофикации является накопление органического вещества (ОВ), его ускоряющаяся седиментация в результате антропогенного воздействия и заиливание неглубоких озер [Глобальный..., 1983; Белкина, 2011; Qian, Brian, 2014; Öztura, Koç, 2023]. Так, в донных осадках (ДО), в которых главенствующую роль имеют

анаэробные процессы: например, в период летней и осенней стратификации водоемов бескислородная минерализация ОВ может достигать 80–90 % общей деструкции ОВ [Кревш и др., 2006; Кревш, Кучинскене, 2012]. Одним из процессов анаэробной минерализации ОВ (наряду с метаногенезом) является микробная сульфатредукция. На относительно глубоководных участках озер с высокой продуктивностью регулярно возникают анаэробные условия в гипolimнии (придонных более холодных слоях воды), обусловленные чаще всего процессами эвтрофикации (в том числе и антропогенной), процесс восстановления сульфатов может охватывать и водную толщу. Наличие или отсутствие свободного сероводорода в водной среде определяется соотношением интенсивности процесса восстановления сульфатов и наличием окислителей и элементов, способных к взаимодействию с ним (оксидов/гидроксидов железа, марганца и др. элементов). Так, микробная сульфатредукция – окислительно-восстановительный процесс, в котором сульфат-ион используется в качестве конечного

акцептора электронов при анаэробном окислении органических веществ или водорода [Глобальный..., 1983; Волков, 1984]. Среди многих факторов, влияющих на процесс сульфатредукции и, как следствие, на характер накопления восстановленных соединений серы, можно выделить следующие [Волков, 1984; Holmer et al., 2001]: содержание сульфатов (акцепторы электронов) – диффузия сульфатов в жидкой фазе возможна до той глубины, пока не произойдет полное их исчерпание [Urban et al., 1994]; количество ОВ и его качественный состав (доноры электронов); антропогенное воздействие; содержание реакционноспособных форм железа, так как железо может связывать образующий сероводород, что приводит к образованию и накоплению сульфидных форм серы в донных отложениях. Все сульфатредуцирующие организмы являются анаэробами, они не способны к чисто автотрофной ассимиляции диоксида углерода и для своего роста нуждаются в готовых органических веществах [Кузнецов, 1952]. При протекании сульфатредукции происходит взаимосвязь глобальных геохимических циклов серы, углерода и железа, а результатом является выделение также губительного для биоты компонента – сероводорода [Кузнецов, 1952; Волков, 1984; Vandel, Koff, 2011; Pester et al., 2012; La, 2022]. С другой стороны, именно продуцирование сероводорода является начальным звеном дальнейшего превращения серы в ее цикле в современных осадках водоемов, итогом которого служит появление и накопление различных по устойчивости соединений восстановленной серы в донных отложениях, и следовательно, токсичный компонент не попадает в водную среду.

Ранее авторами были изучены водоемы с минимальной или отсутствующей антропогенной нагрузкой в таежной зоне на юге Архангельской области. Несмотря на минерализацию воды не более 200 мг/л и ее карбонатно-кальциевый тип, содержание сульфатов варьировало от 3 до 60 мг/л. Наблюдалось увеличение концентраций сульфатов в толще донных отложений, что связано с поступлением подземных вод с повышенным содержанием сульфатов. Так, в оз. Святое сульфатредукция протекала в донных отложениях в поверхностных горизонтах осадков (до 10 см) и более явно выражена в их толще (глубина более 25 см), что характерно для обеих станций в разных частях акватории водоема в летний и зимний периоды. Данные микробиологических исследований о наличии максимальной численности сульфатредуцирующих бактерий и интенсивности сульфатредукции в поверхностных

горизонтах осадков с последующим затуханием процесса и активизацией его вновь в горизонтах отложений ниже 20 см подтверждают наблюдаемые нами результаты по распределению форм восстановленной серы и остаточных сульфатов. Среднее значение общего количества серы в осадках данного озера составляло 0,5 %. На долю соединений восстановленной серы приходилось 50–60 %. Среди соединений восстановленной серы основную роль играет сера органических веществ $S_{\text{орг}}$ – 71–73 % от ΣSH_2S , доля сульфидных форм – 23 %, среди которых доминирующим является пирит [Титова, Кокрятская, 2014]. В оз. Назаровское более интенсивно восстановление сульфатов в донных осадках осуществлялось в летний период (максимальная скорость процесса составляла 555 мкг S/дм³ сут), хотя активность этого процесса в целом не столь велика. При этом среднее количество соединений восстановленной серы в отложениях составляло в марте $1,36 \pm 0,88$ %, в июле – $1,48 \pm 0,90$ %. Из сульфидных форм в оз. Назаровском доминировала пиритная сера. Ни зимой, ни летом не выявлено значимой зависимости между содержанием восстановленной серы и скоростью процесса сульфатредукции для ДО исследуемого озера [Титова и др., 2019]. Содержание соединений восстановленной серы в донных осадках оз. Белое в среднем за все время наблюдений составляло 1,90 %, в том числе 1,60 % зимой, 2,09 % летом. В июле во все годы исследования доминировала только пиритная сера (до 80 %). Максимальное количество серы пирита отмечено в марте 2009 (7,60 %) и 2013 (7,94 %) годов; летом эти величины были несколько меньше – 5,22 и 4,06 % соответственно. Выявленные особенности протекания сульфатредукции в воде и донных отложениях оз. Белое Коношского района Архангельской области показали, что восстановление сульфатов в этом водоеме осуществлялось активнее, чем в других пресноводных озерах на территории региона [Титова и др., 2025].

Целью работы являлось изучение протекания взаимосвязанных процессов циклов углерода, серы и железа под влиянием антропогенных и природных факторов на примере двух водоемов таежной зоны, гидрографически связанных между собой и отличающихся по антропогенному воздействию.

Материалы и методы

Объектом настоящего исследования является система двух малых таежных озер Верхнее и Нижнее в непосредственной близости

от районного центра Архангельской области пгт. Коноша (рис. 1). Берега оз. Нижнее жилые, здесь расположены частные и многоквартирные дома с придомовыми огородами, не подключенные к централизованному водоснабжению и водоотведению. Несколько десятилетий указанный водоем очень активно в любое время года используется местными жителями для полоскания белья, а особенно для чистки ковров с моющими средствами. Результатом чего является эвтрофирование озера, сопровождающееся развитием фитопланктона и макрофитов (особенно нитчатых водорослей), образованием в нижних слоях воды в период стратификации анаэробных условий с появлением и накоплением значительных количеств сероводорода [Кокрятская и др., 2023]. Озеро Верхнее расположено севернее первого водоема, из него берет начало протока в оз. Нижнее длиной около 500 м (рис. 1). На одном из берегов оз. Верхнее расположена одноименная деревня, насчитывающая не более 20 домов, жилых в основном в летне-осенний период.

Водоемы близки по морфометрическим характеристикам: оз. Нижнее – длина 1,5 км, ширина 0,4 км, площадь 0,6 км², средняя глубина 3–4 м; оз. Верхнее – 1,5 км, 0,6 км, 0,9 км², 2 м соответственно. По результатам батиметрической съемки в обоих озерах выявлены глубоководные участки (глубиной до 5,5 м) – в оз. Нижнее в северной (ст. 10), центральной (ст. 11) и южной (ст. 12) его частях, а также в центральной части оз. Верхнее (ст. 20).

Оба водоема относятся к димиктическим. В период зимней и летней межени стратифицированы. В эпилимнионе оз. Нижнее количество кислорода изменялось в летний период в интервале 8,0–12,5 мг/л. На глубине 3–3,5 м содержание кислорода уменьшалось на 3–4 мг/л, а к придонным слоям при стагнации воды наблюдается его снижение до 2 мг/л и почти полное исчерпание на ст. 10 и 12. Кислородные условия в воде оз. Верхнее более благоприятны для жизни гидробионтов. Верхние слои водной толщи содержат кислород. По мере погружения наблюдается монотонное снижение O₂, и в гиполимнионе его концентрация составляет

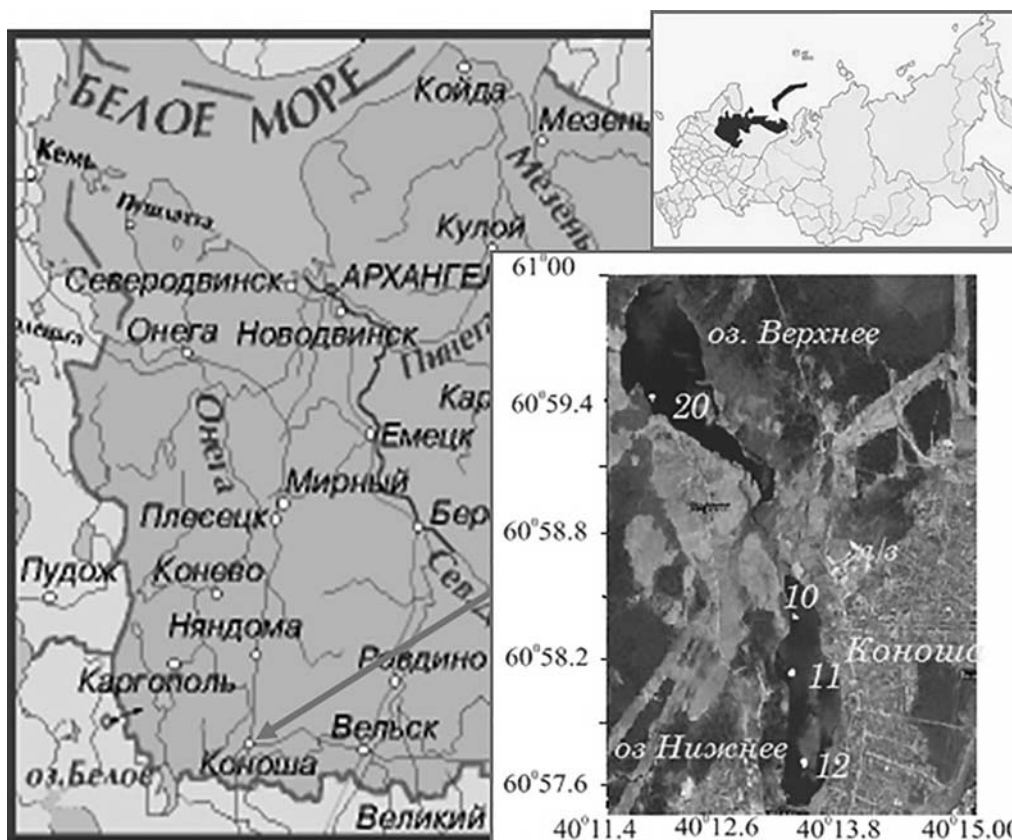


Рис. 1. Карта-схема области исследований и станций отбора проб донных отложений в 2012–2014 гг.

Fig. 1. Schematic map of the area of research and sampling stations of bottom sediments in 2012–2014

немногим более 2 мг/л. В зимний период насыщены кислородом только поверхностные слои (до 1 м) воды в обоих озерах, наблюдалось создание анаэробных условий с глубины от 2 м и до дна. Среднее содержание сульфатов в воде оз. Нижнее по всей его акватории составляло от 2,80 мг/л зимой и 3,30 мг/л летом. Наблюдалось уменьшение концентраций в гипolimнионе на 1–2 мг/л. В воде озера Верхнее сульфатов содержится меньше – в среднем 1,45 мг/л, по сезонам различие незначительно. Среднее содержание сульфидов в эпилимнионе по всей акватории озера Нижнее составляло 3 мкг/л. В зимний период его концентрации практически не увеличивались ко дну, а в летний достигали в придонных слоях 100–200 мкг/л. В воде оз. Верхнее сульфиды по всему водному столбу и в оба сезона не превышали 4–5 мкг/л. Содержание растворенного железа в воде оз. Нижнее по водному столбу от эпи- к гипolimниону изменялось от 100–300 до 500 мкг/л зимой и 3000 мкг/л летом, в оз. Верхнее содержание железа изменялось в более узком диапазоне от 100 до 300 мкг/л. При этом наблюдалось изменение соотношения форм в составе растворенного железа – в эпилимнионе доминировало окисленное железо, в гипolimнионе – его восстановленная форма [неопубл. данные].

Пробы донных осадков отбирали на наиболее глубоководных участках водоемов с помощью гравитационной трубки. Максимальная длина керна отобранных отложений на обоих озерах не превышала 36 см, дискретность отбора проб составляла в основном 5 см. Для изучения сезонности протекания процессов в осадках они отбирались в межледовый зимний и летний периоды с 2012 по 2014 год, когда наблюдалась стратификация воды водоемов. Отбор осуществлялся на одних и тех же станциях, местоположение которых фиксировалось с помощью координатной привязки и ориентацией на местности. Образцы помещались в герметичные пакеты и в охлажденном состоянии были доставлены в лабораторию для проведения анализов.

Определение гранулометрического состава донных осадков проводили в соответствии с ГОСТ 12536-79 с дополнительной обработкой ультразвуком для механического диспергирования осадка. Определение общего и органического углерода и азота выполняли методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на CHN-анализаторе (Hewlett-Packard, США). Определение влажности осуществляли высушиванием образца в сушильном шкафу при 100–110 °C до постоянной массы.

Определение реакционноспособных форм железа (II и III) проводили по методике, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Соколов, 1980]. В процессах изменения и превращения форм нахождения элементов, перераспределения элементов в осадках, разнонаправленного обмена химическими элементами между осадками и наддонной водой принимает участие не вся масса элементов осадков, а только ее растворимая часть, присутствующая в составе иловых (поровых) вод, или реакционноспособная (легкоподвижная) часть общей массы элементов твердой фазы, способная в определенных условиях диагенеза либо к полному растворению, либо к переходу в более растворимые формы. Миграция элементов в растворенной форме и их соединений возможна при наличии поровой воды в осадках и условий, при которых не теряет растворимости или не снижается до минимума концентрация. При этом понятие реакционноспособных форм в какой-то мере носит условный характер. Например, в ходе диагенеза заведомо реакционноспособные формы переходят в инертные (пиритизация, старение и дегидратация гидроксидов). Однако если поместить пиритосодержащие осадки в окислительную среду, то сера и железо сравнительно быстро будут мобилизованы и включены в процессы превращения в результате процессов окисления [Волков и др., 1980; Розанов и др., 1980; Булаев, 2020]. Для определения реакционноспособного железа в современных осадках используются различные методы: либо различные вытяжки (например, по методике Тессьера) [Tessier, 1979], либо кислотное выщелачивание. При использовании кислоты в состав реакционноспособного железа включаются гидроксиды, карбонаты, аутигенные силикаты и кислоторастворимые сульфиды (гидротроилит, грейгит, маккиновит). Метод, применяемый в Институте океанологии им. П. П. Ширшова, предусматривает обработку осадка 3,5N H₂SO₄. По этой методике в раствор переходят все перечисленные формы железа. При анализе восстановленных осадков оба метода не затрагивают железо аутигенного пирита, поэтому его рассчитывают отдельно по содержанию пиритной серы, так же как поправку на железо растворимых сульфидов вводят по содержанию моносulfида железа. Таким образом, в понятие реакционноспособного железа включаются:

$$Fe_{\text{реакц}} = Fe(II) + Fe(III) + Fe_{\text{сульфид}}$$

Сульфидное железо рассчитывается по результатам определения сульфидной серы (гидротроилит) и серы пирита, т. е. $\text{Fe}_{\text{сульфид}} = \text{FeFeS} + \text{FeFeS}_2$ [Волков и др., 1980; Розанов и др., 1980, 2006; Соколов, 1980; Кокрятская и др., 2003]. По данной методике в понятие «реакционноспособное железо» включается минеральное железо, которое «потенциально» может участвовать в переходах из твердой фазы в жидкую и обратно при изменении физико-химических условий в осадках и в воде водоема. Существуют и несколько иные трактовки понятия «реакционноспособное железо»: например, имеется в виду только та фракция железа в морских отложениях, которая легко реагирует с сульфидом (продуктом разнородного сульфатного восстановления) с образованием различных минералов сульфида железа и в конечном счете – пирита. К этой фракции в основном относят различные оксиды и гидроксиды железа [Berner, 1970; Canfield, 1989; Raiswell, Canfield, 1998]. При этом непосредственно в образовании пирита участвуют соединения железа (II) (схематичное представление): $\text{Fe}^{2+} + \text{HS}^- \leftrightarrow \text{FeS} + \text{H}^+$, $\text{S} + \text{FeS} \leftrightarrow \text{FeS}_2$ [Волков, 1984; Canfield, 1989].

Определение форм железа титриметрическое. Fe(II) определяли в одной аликвоте раствора титрованием $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, Fe(III) – из другой аликвоты, титрованием $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ выделившегося I_2 после обработки KI. Содержание реакционноспособного железа ($\text{Fe}_{\text{реакц}}$) получали в результате сложения вышеперечисленных форм:

$$\text{Fe}_{\text{реакц}} = \text{Fe(II)} + \text{Fe(III)} + \text{Fe}_{\text{сульфид}} + \text{Fe}_{\text{пирит}}$$

[Соколов, 1980].

Определение различных форм серы проводили по методике, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Остроумов, 1953; Волков, Жабина, 1980]. Последовательно определены: сульфидная (кислоторастворимая), сульфатная, элементная, пиритная и органическая формы серы из одной навески донных осадков естественной влажности. Содержание общей серы было получено сложением концентраций вышеуказанных форм. Расчет (в %) проводился на абсолютно сухое вещество.

Серу кислоторастворимых сульфидов выделяли с помощью разбавленной соляной кислоты с нагреванием до кипения и одновременной отдувкой аргоном сероводорода. Окончание определения в зависимости от количества образующегося сероводорода йодометрическое или фотометрическое.

Осадок после обработки промывали теплой водой до 3 раз и использовали для последующего анализа.

Для определения *сульфатной серы* использовали объединенный с промывными водами фильтрат. Сульфаты осаждали в виде BaSO_4 , прокаливали в кварцевом тигле при 800–850 °C, определяли содержание гравиметрически.

Оставшийся осадок высушивали при комнатной температуре, экстрагировали горячим ацетоном в аппарате Сокслета в течение нескольких часов. Для определения *элементной серы* часть полученного экстракта обрабатывали раствором CrCl_2 , отгоняя аргоном выделяющийся в результате реакции сероводород. Окончание определения фотометрическое в виде метиленового синего.

В осадке уже после экстракции определяли *пиритную серу* после восстановления ее раствором CrCl_2 в сильноокислой среде до H_2S , количество которого определяли методом объемного йодометрического титрования.

Оставшийся после определения пиритной серы осадок отмывали от ионов хрома разбавленным раствором соляной кислоты, подвергали полной минерализации, переводя *органическую серу* в сульфат, количество которого определяли гравиметрически.

Результаты усреднялись (из-за неравномерности выборки приводятся медианные значения величин), статистическая обработка выполнена в Excel. Погрешность измерений – 10 %.

Результаты и обсуждение

Осадки глубоководных станций озера Нижнее представлены в основном пелитовыми, пелитово-алевритовыми и алевритово-пелитовыми илами. Отложения озера Верхнее вниз по разрезу представлены преимущественно пелитовыми илами, содержание пелитовой фракции в общем содержании фракций не опускается ниже 71,5 %.

Все исследованные донные отложения были сильно обводнены, причем не только их поверхностные горизонты, где значения естественной влажности составляли в среднем 91 % (от 86 до 98 %) для оз. Нижнее и 93 % (от 89 до 97 %) для оз. Верхнее. По мере погружения в толщу ДО количество влаги уменьшалось незначительно и в нижних слоях отложений составляло 88–89 %.

Все осадки, отобранные для исследования, были обогащены органическим веществом, содержание которого оценено по количеству органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$) – в среднем для оз. Нижнее и Верхнее 15,80 и 17,79 % соответственно (здесь и далее в расчете на сухое

вещество осадка), что составляет около 90 % от содержания общего количества углерода. Наиболее высокие значения показателя отмечены в верхних слоях отложений – в среднем 18,61 и 20,09 % соответственно (рис. 2, а). Вниз по разрезу количество ОВ заметно снижается (в среднем на 30 % в сравнении с поверхностными слоями от исходного количества) вследствие протекания процессов его минерализации. Максимальные количества органического вещества отмечены в летний период. Среднее содержание органического азота составляло 1,25 и 1,40 % (рис. 2, б) (оз. Нижнее и Верхнее соответственно), или около 85 % от его общего содержания. Значения отношения органического углерода к азоту (C/N-отношение) минимальны в поверхностных слоях осадков (от 8 до 12) (рис. 2, в), что позволяет говорить о преобладании в них планктонного ОВ. В толще отложений происходит минерализация ОВ, вследствие чего величина отношения C/N изменяется.

Содержание реакционноспособного железа ($Fe_{\text{реакц}}$), то есть способного к участию в окислительно-восстановительных реакциях и переходу из жидкой фазы осадков в твердую, в ДО трех станций оз. Нижнее (рис. 3, а, б) составляло в среднем 3,32 %, изменяясь в широком интервале концентраций (от 0,25 до 13,06 %). Среднее содержание $Fe_{\text{реакц}}$ в отложениях оз. Верхнее составляло 3,40 %, изменялось от 1,17 до 8,74 % (рис. 3, в). Максимальные концентрации этого показателя отмечены в поверхностных горизонтах кернов. Снижение содержания $Fe_{\text{реакц}}$ в толще отложений можно связать, во-первых, с протеканием процессов

деструкции органического вещества (первоначально высвобождение железа из комплексных соединений с органическим веществом), что подтверждается и снижением количества $C_{\text{орг}}$ при движении вниз по колонке от 19 до 12 %; во-вторых, с восстановительными процессами, протекающими в анаэробных условиях, в результате которых железо может переходить из твердой фазы отложений в иловую воду и пополнять соединениями железа вышележащие слои осадков.

В донных отложениях оз. Нижнее среднее содержание Fe(III) составляет 2,15 %, не связанного с серой Fe(II) – 1,15 % (или около 35 % от $Fe_{\text{реакц}}$), при том, что количество связанного в сульфиды железа не превышает 3 % от $Fe_{\text{реакц}}$. В осадках оз. Верхнее доля восстановленной формы в среднем составляла 24 % от $Fe_{\text{реакц}}$ или в абсолютных концентрациях 0,59 %, Fe(III) – 2,79 %. Вклад сульфидных форм составлял в среднем около 1 % от $Fe_{\text{реакц}}$.

Установлены сезонные различия в накоплении $Fe_{\text{реакц}}$ в кернах (здесь и далее речь о кернах, колонках отложений). Так, в зимний период его концентрация составляет в среднем 2,64 и 1,70 %; летом значение показателя несколько выше – в среднем 3,52 и 3,95 %; кроме того, именно летом зафиксированы его максимальные концентрации – 13,06 и 8,74 % соответственно для оз. Нижнее и Верхнее. Повышенное содержание реакционноспособного железа по всему керну в летний период связано, скорее всего, с двумя факторами: с поступлением с водосбора аллохтонного материала в поверхностный горизонт отложений и с его переходом из растворенного состояния в коллоидное,

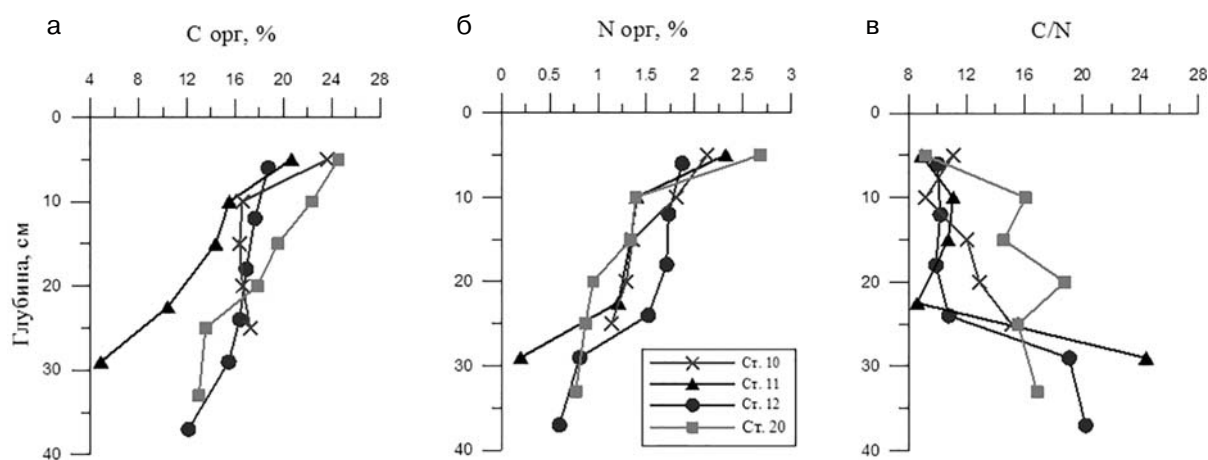


Рис. 2. Содержание органического углерода (а), азота (б) и соотношение C/N (в) в донных отложениях озер Нижнее (ст. 10, 11, 12) и Верхнее (ст. 20)

Fig. 2. Organic carbon (a), nitrogen (б) and C/N ratio (в) in bottom sediments of Lakes Nizhneye (stations no. 10, 11, 12) and Verkhneye (station no. 20)

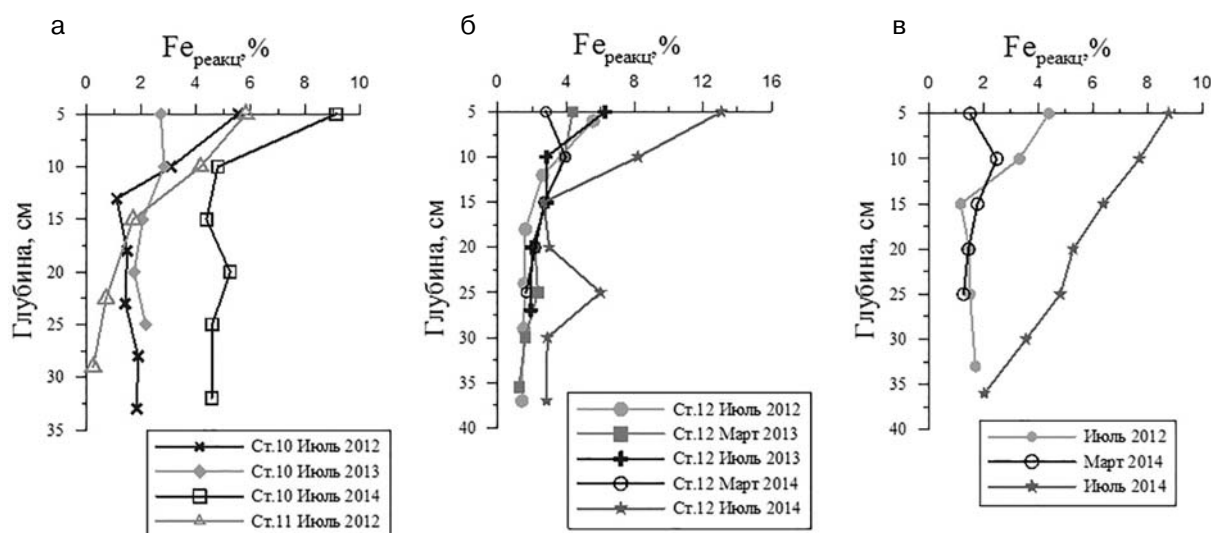


Рис. 3. Содержание реакционноспособного железа в донных отложениях озер Нижнее – ст. 10 и 11 (а), ст. 12 (б) и Верхнее (в)

Fig. 3. Content of reactive iron in bottom sediments of Lake Nizhneye (a) at stations no. 10 and 11, (б) Lake Nizhneye at station no. 12, and Lake Verkhneye (в)

а далее в твердую фазу осадка в результате окислительных процессов в период открытой воды.

В донных отложениях оз. Нижнее сера представлена преимущественно восстановленными формами, составляющими в сумме 62 % от ее общего содержания. Общее содержание соединений восстановленной серы ($\Sigma \text{SH}_2\text{S}$) представляет собой сумму продуктов трансформации бактериального сероводорода в ДО, куда входят кислоторастворимые сульфиды (S^{2-}), элементная (S^0) и пиритная сера ($\text{S}_{\text{пирит}}$), также сера в составе органических соединений ($\text{S}_{\text{орг}}$) [Волков, 1984]. В ДО оз. Нижнее ее среднее содержание за период исследований составляло 0,18 % (при объеме выборки $n = 53$). Для сравнения средние значения $\Sigma \text{SH}_2\text{S}$ в осадках озер Кенозерского национального парка: Вильно (0,21 %) < Саргозеро (0,28 %) < Масельгское мелководные участки (0,32 %) < Масельгское глубоководные участки (0,38 %) [Титова, Кокрятская, 2018]; Ротковецких озер: Святое глубоководная станция (0,23 %) < Святое мелководная станция (0,41 %) < Назаровское (1,68 %) < Белое (2,90 %) [Титова и др., 2017, 2019]; озера Байкал – от 0,01 до 0,15 % [Лазо, 1980]. Таким образом, уровень содержания восстановленной серы в озере Нижнее можно оценить как невысокий.

Распределение восстановленной серы в донных отложениях оз. Нижнее в 2012–2014 гг. представлено на рис. 4. Минимальное значение $\Sigma \text{SH}_2\text{S}$ за все время исследований составляло 0,02 %, максимальное – 1,12 %, при интервале преимущественных концентраций

от 0,09 до 0,22 %. Рассматривая изменение параметра в сезонном аспекте, стоит отметить, что в период зимней межени в донных отложениях оз. Нижнее накапливалось восстановленной серы в среднем 0,20 %, что составляет 70 % от общего количества серы в ДО. Летом содержание $\Sigma \text{SH}_2\text{S}$ несколько меньше – 0,17 % (60 % от $\Sigma \text{SH}_2\text{S}$).

Выявлены различия в накоплении восстановленной серы в разных частях акватории оз. Нижнее. В осадках ст. 10, расположенной в северной части озера, среднее содержание $\Sigma \text{SH}_2\text{S}$ составляло 0,16 % (от 0,06 до 0,26 %). В осадках ст. 11 (центральная часть водоема) ее количество существенно ниже – 0,06 %. Наиболее активно процесс сульфатредукции протекал в ДО ст. 12, расположенной в южной, более широкой и открытой части водоема, где среднее содержание соединений восстановленной серы составляло 0,21 %, изменялось преимущественно в интервале от 0,10 до 0,23 %. На этой же станции отмечено и максимальное (за время проведения исследований) значение показателя 1,12 %. Возможно, интенсификация процесса является отражением большего прогрева эпилимниона на этом участке из-за его открытости (наиболее широкая часть озера, практически не закрыта деревьями по берегам) – так, по данным для июля 2014 г. температура воды на ст. 12 на глубине 2 м составляла 21,8 °C, при этом на ст. 10 – всего 15,3 °C, в то время как на ст. 10 на этом же горизонте вода была менее прогрета – от 18,3 до 15,3 °C [Кокрятская и др., 2023].

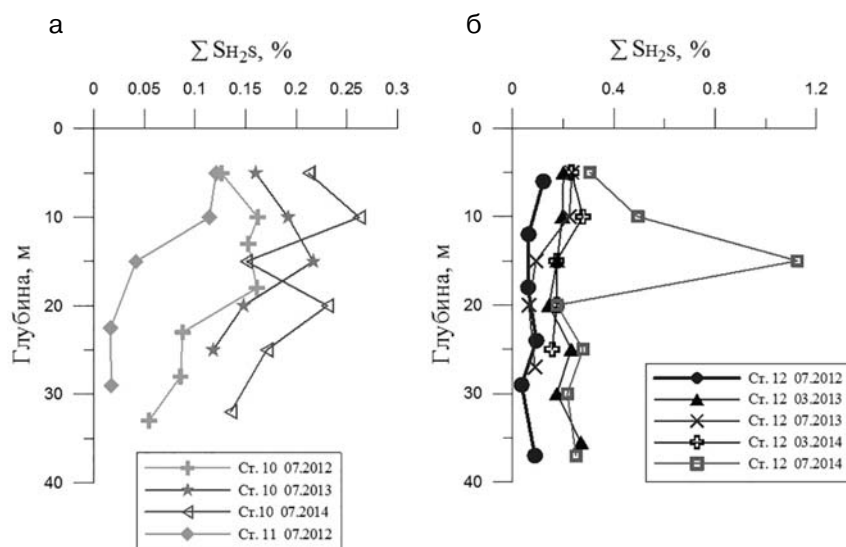


Рис. 4. Распределение общего содержания восстановленной серы в донных отложениях озера Нижнее в 2012–2014 гг.: а) ст. 10 и 11; б) ст. 12

Fig. 4. Distribution of the total content of reduced sulfur in bottom sediments of Lake Nizhneye in 2012–2014: а) stations no. 10 and 11, б) station no. 12

Исходя из полученных данных, можно заключить, что наиболее активно восстановительные процессы протекают именно на ст. 12, для которой более детально рассмотрим распределение отдельных форм восстановленной серы, составляющих $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$. Так, количество кислоторастворимых сульфидов, которые образуются при взаимодействии продуцируемого в ходе сульфатредукции сероводорода с ионами металлов, в частности и главным образом с железом, составляло в среднем 0,03 %. Элементарная сера, образующаяся только в результате окисления сероводорода и поэтому являющаяся своеобразным маркером наличия его в среде, насчитывала 0,01 %. Количество пиритной серы, образующейся при взаимодействии моносulfида железа и элементарной серы, – 0,02 %. Образование органических производных серы происходит при взаимодействии элементарной серы (или сероводорода) с продуктами процесса метаморфизма органического вещества. Такое взаимодействие доказано результатами химических и изотопных исследований [Волков, 1984]. Кроме того, сера в составе органических веществ присутствует в живых организмах, например, в составе аминокислот. В ходе ассимиляции сульфатов в растениях образуется цистеин. Эта белковая аминокислота является предшественником для синтеза метионина и глутатиона. Последний выступает для растений в качестве источника органической небелковой серы и является важной

формой восстановленной серы [Волков, 1984]. Отделить эту биогенную серу от образующейся в ходе диагенетических преобразований при проведении аналитического определения не представляется возможным, поэтому речь идет о сумме указанных составляющих органической серы [Fakhraee et al., 2017; Rasigraf et al., 2020; Jiang et al., 2020; Aliff et al., 2020]. Содержание этой формы серы составляло в среднем 0,15 %. Оценивая вклад указанных выше форм в их суммарное содержание, отметим доминирование органической серы, составляющей в среднем 73 % от $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$, далее следовали сульфидные формы: $\text{S}_{\text{пирит}}$ (13,41 %) и S^{2-} (10,52 %); замыкает ряд элементарная сера – 3,5 %.

Можно отметить наличие сезонности в распределении отдельных форм в составе $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$ при близких абсолютных значениях ее концентраций – в среднем 0,18 % (при интервале концентраций от 0,14 до 0,28 %) зимой и 0,22 % (от 0,04 до 1,12 %) летом. Так, в зимний период (рис. 5, б) в составе $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$ преобладала органическая сера – 86 %, а вклад сульфидных форм составлял: S^{2-} – 3,21 % и $\text{S}_{\text{пирит}}$ – 8,38 %; элементарной – около 2 %. Однако летом (рис. 5, а, в), хотя органическая сера оставалась доминирующей формой в общем содержании восстановленной серы, ее вклад снижался более чем на 20 % (63 % от $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$), а доля сульфидных форм существенно возрастала, составляя для S^{2-} 15 % от $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$ и $\text{S}_{\text{пирит}}$ – 16,77 %; элементарной серы – 4,6 %.

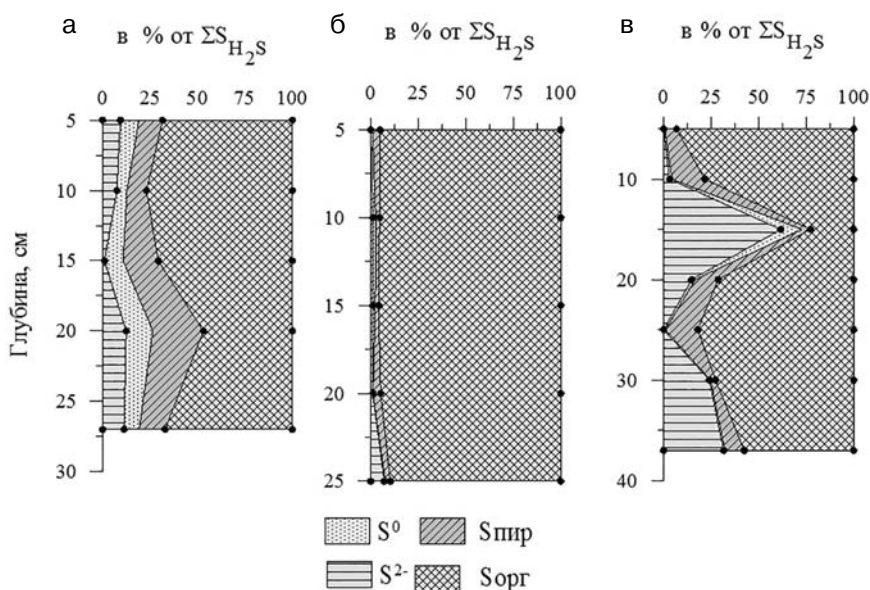


Рис. 5. Распределение форм восстановленной серы в составе их суммы в донных отложениях станции 12 озера Нижнее в 2012–2014 гг.: а) июль 2012, б) март 2014, в) июль 2014

Fig. 5. Distribution of forms of reduced sulfur in bottom sediments at station no. 12 of Lake Nizhneye in 2012–2014: а) July 2012, б) March 2014; в) July 2014

Такое сезонное перераспределение отдельных форм в составе их суммы может свидетельствовать об активизации процесса сульфатредукции в летний период, когда увеличивается поступление свежего автохтонного вещества в поверхностный слой осадков.

Анализ данных рис. 4 и 5 позволяет говорить о том, что в толще отложений процесс сульфатредукции протекает с различной интенсивностью. Так, в верхнем слое отложений (от 0 до 15 см) вклад восстановленной серы в общее ее содержание ($S_{\text{общ}}$) в ДО составлял 61 % (или 0,26 % в абсолютных концентрациях). Можно отметить, что в самом верхнем слое осадка (до 5 см) при сопоставимых значениях абсолютных величин (0,22 %) доля ΣSH_2S не превышала 43 % от $S_{\text{общ}}$. Однако ниже горизонта 15 см вклад восстановленной серы в $S_{\text{общ}}$ увеличился в среднем до 78 %, при том что по абсолютной величине оба показателя были ниже, чем в верхних слоях отложений, – 0,21 и 0,16 % соответственно. Данный факт свидетельствует о заметном сокращении количества сульфатов вследствие их расхода в ходе сульфатредукции вниз по разрезу.

В ходе исследования определена численность сульфатредуцирующих бактерий во время периода исследований [неопубл. данные]. При этом не обнаружена взаимосвязь между этим показателем и концентрациями соединений восстановленной серы.

Стоит отметить, что в июле 2014 г. в осадках ст. 12 установлено максимальное накопление восстановленной серы – 1,12 % (рис. 4, б), при том что определяющий вклад в ее состав – до 50 % и более от ΣSH_2S – вносили сульфидные формы (рис. 5, в). Анализируя распределение ΣSH_2S (рис. 6), можно отметить, что максимуму ΣSH_2S на глубине от 10 до 15 см предшествовали максимумы в содержании сульфатов (0,72 %) и $C_{\text{орг}}$ (15,80 %) в вышележащем слое ДО. В нижележащем слое значение обоих показателей резко снижалось, составляя для сульфатов всего 0,26 %, что, вероятно, свидетельствует о потреблении их микроорганизмами в процессе сульфатредукции. Об активном восстановлении сульфатов в осадках этой станции в июле 2014 г. можно судить по доминированию сульфидных форм в составе ΣSH_2S (рис. 5, в). Скорее всего, повышенное содержание сульфатов в ДО, расположенных до горизонта 20 см, обусловлено как их поступлением с водосбора, так и возможным окислением соединений восстановленной серы в периоды гомотермии. Также причиной этого выступает минерализация ОБ с образованием низкомолекулярных соединений, доступных для сульфатредуцирующих бактерий, – активизация последних уже в теплых анаэробных водах гипolimниона способствовала активному образованию сероводорода и его производных. Максимальное содержание соединений

восстановленной серы в донных отложениях оз. Нижнее на ст. 12 обнаружено на горизонте 10–15 см, а не в поверхностном горизонте. Этот факт можно связать с тем, что остаточное количество кислорода в верхних слоях препятствует накоплению сульфидных форм серы или активизации деятельности сульфатредуцирующих бактерий, а именно в указанном горизонте сложились благоприятные для микробных процессов условия (наличие необходимых для функционирования бактерий органических веществ, содержание сульфатов, строго анаэробная обстановка). Отмечены снижение содержания органической формы серы и переход ее в сульфидную составляющую (рис. 5, в). Доминирование этой формы восстановленной серы может свидетельствовать об относительно недавнем времени образования сероводорода (распределение форм в марте и июле – рис. 5, б, в) и связывании его в кислоторастворимые сульфиды, так как они неустойчивы и могут окисляться как химическим, так и микробиологическим путем (при небольшой глубине озера в период гомотермии возможно проникновение кислорода в глубь отложений), или может наблюдаться образование пирита или элементарной серы как несколько более устойчивых соединений. Также обмен материалами между восстановительными и окислительными средами может осуществляться за счет увеличения площади контакта между двумя зонами.

Это увеличение создается, например, роющей (закапывающейся) макрофауной, которая перекачивает дыхательную воду вниз в осадок, и таким образом образуются окисленные стенки тоннелей, трубок [Jorgensen, 1977].

Содержание соединений восстановленной серы в донных отложениях оз. Верхнее составляло в среднем 0,26 %, изменялось в интервале преимущественных значений от 0,09 до 0,46 % (рис. 7, а). Доминирующей среди форм восстановленной серы во все сезоны исследований была органическая составляющая, вклад которой в $\Sigma \text{SH}_2\text{S}$ составлял в среднем 85 %, изменяясь от 60 до практически 100 % (рис. 7, б–г).

Наиболее высокие значения $\Sigma \text{SH}_2\text{S}$ в отложениях озера Верхнее, так же как и для оз. Нижнее, отмечены в июле 2014 г. (рис. 7, в), когда суммарное содержание соединений восстановленной серы составляло в среднем 0,46 %, изменяясь преимущественно в интервале от 0,45 до 0,49 %. Однако в отличие от ст. 12 оз. Нижнее в осадках данного водоема главенствующую роль среди соединений восстановленной серы играла органическая сера.

Возможно, повышенные количества органической серы в летний период 2014 г. обусловлены не только протеканием процесса сульфатредукции, но и поступлением остатков водорослей, активно разросшихся в условиях аномально теплого лета 2014 г. (рис. 8).

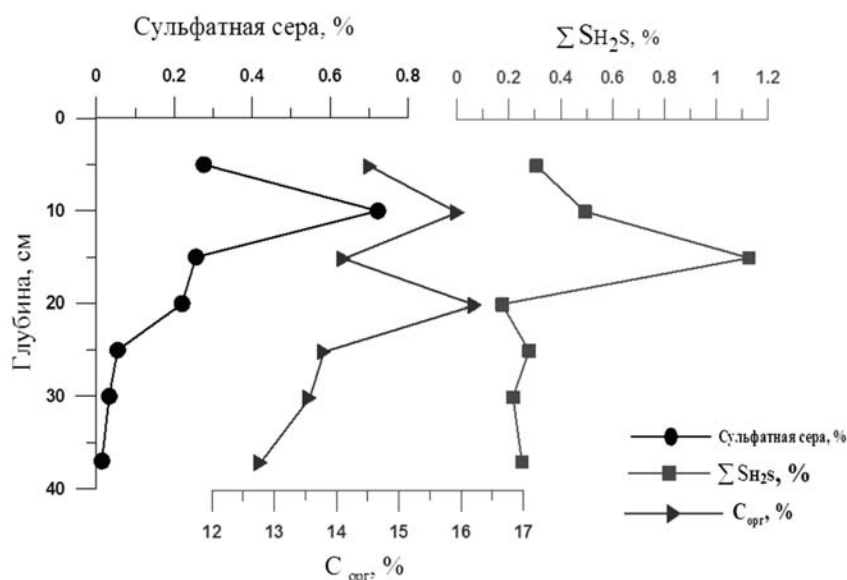


Рис. 6. Распределение сульфатной серы, органического углерода и соединений восстановленной серы в донных отложениях озера Нижнее (ст. 12), июль 2014 г.

Fig. 6. Distribution of sulphate sulfur, organic carbon and reduced sulfur compounds in bottom sediments of Lake Nizhneye (station no. 12), July 2014

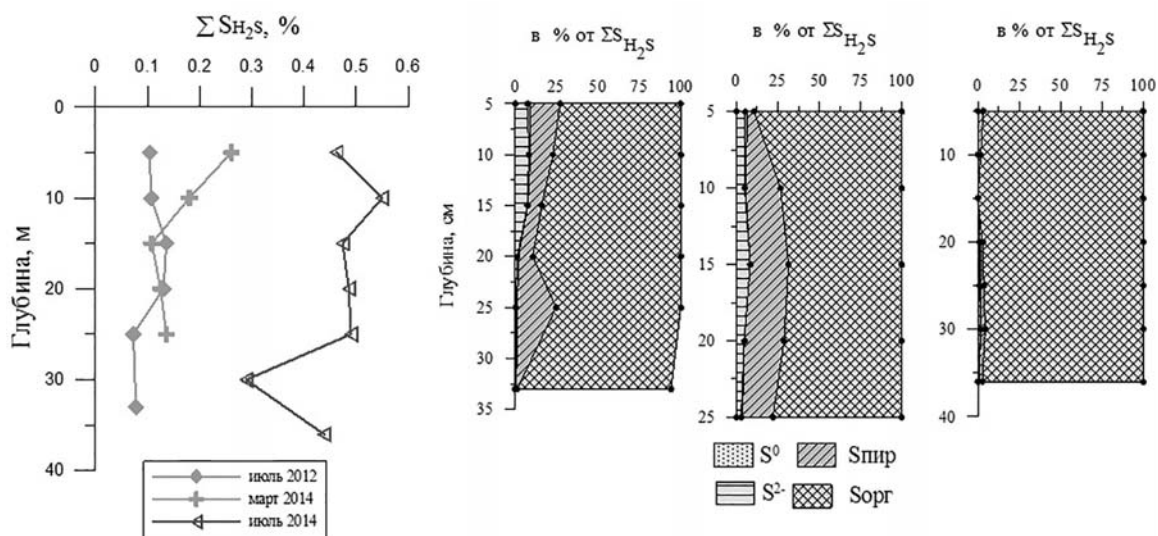


Рис. 7. Распределение общего содержания восстановленной серы (а) и соотношения форм в составе ΣSH_2S года в донных отложениях озера Верхнее (ст. 20) в 2012–2014 гг.: б) июль 2012 года; в) март и г) июль 2014

Fig. 7. Distribution of the total content (a) and of reduced sulfur in bottom sediments of Lake Verkhneye (station no. 20) in 2012–2014: б) July 2012; в) March and г) July 2014



Рис. 8. Озеро Нижнее в июле 2014 г.

Fig. 8. Lake Nizhneye, July 2014

Содержание органического вещества было соизмеримо с ранее полученными данными. Значения количества сульфатов в июле 2014 г. в среднем были выше в 4 раза (0,12 %) по сравнению с аналогичным периодом 2012 г. (0,03 %). Увеличение количеств S_{org} может быть связано с произрастанием как высшей растительности, так и водорослей, в составе органического вещества которых содержится сера. Ее количество, по нашим неопубликованным данным, в растительности оз. Верхнее может достигать 0,29 % (в расчете на сухое вещество). Для отложений оз. Верхнее, отобранных в июле 2014 г., коэффициент парной корреляции для параметров C_{org} и S_{org} составлял $r^2 = 0,80$; $p = 0,05$ и был еще выше без учета данных для нижнего горизонта отложений ($r^2 = 0,99$; $p = 0,05$); в июле 2012 г. $r^2 = 0,71$; $p = 0,05$;

для отложений оз. Нижнее того же периода $r^2 = 0,36$; $p = 0,05$.

Однако отметим, что в ходе проводимых нами исследований [Титова и др., 2017, 2019] для донных отложений Ротковецких озер (Коношский район Архангельской области, 50 км южнее изучаемой системы озер) отмечена тенденция к снижению содержания органической серы в летний период по сравнению с зимним, что связано, скорее всего, с минерализацией ОВ.

Не выявлено значимой корреляции между содержанием в осадках озер Нижнее и Верхнее как восстановленной, так и общей серы с количеством органического вещества (в пересчете на органический углерод), что можно объяснить его расходом на другие процессы в донных отложениях и пополнением количества

сульфатов в ходе окисления восстановленной серы без участия ОВ.

На основании балансовых уравнений расхода органического вещества [Страхов, 1976], согласно которым на образование 1 % $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$ требуется 0,75 % $\text{C}_{\text{орг}}$, а на восстановление 1 % Fe(III) 0,05 % $\text{C}_{\text{орг}}$, получены данные по расходу ОВ на восстановление серы и железа в донных осадках озер Нижнее и Верхнее. В донных отложениях оз. Нижнее расход ОВ на восстановление серы составлял в среднем 0,14 %, что в 2,3 раза больше, чем на восстановление железа. Однако если расход $\text{C}_{\text{орг}}$ на восстановление железа в толще отложений может снижаться по сравнению с поверхностными горизонтами в 3,5 раза, то затраты ОВ на восстановление серы в большинстве случаев изменяются не столь значительно. Сравнивая средние значения величины расхода ОВ на протекание сульфатредукции и количества остаточного (содержащегося в осадках на момент исследования) ОВ соответственно, можно выстроить следующий ряд для оз. Нижнее: ст. 11 (0,05 и 13,17 %) < ст. 10 (0,12 и 17,29 %) < ст. 12 (0,16 и 15,52 %). Расход $\text{C}_{\text{орг}}$ на восстановление серы по сезонам (на примере ст. 12) составлял в среднем 0,15 % в марте и 0,17 % в июле. Сравнивая изменение этого показателя для летнего периода по годам, получаем, что затраты ОВ для ст. 10 были в 2012 г. – 0,09 %, в 2013 г. – 0,13 %, в 2014 г. – 0,15 %; для ст. 12 они составили – 0,06; 0,11 и 0,30 % соответственно (максимально 0,84 %).

Расход органического углерода на восстановление серы в донных отложениях оз. Верхнее в июле 2014 г. превышает в несколько раз эту величину для других периодов исследования. Без учета данных лета 2014 г. средний расход ОВ на образование соединений восстановленной серы составлял 0,09 %, что в 1,5 раза ниже, чем для донных отложений озера Нижнее и в 3 раза выше, чем расход органического углерода на восстановление железа.

Заключение

В донных отложениях системы озер Верхнее – Нижнее восстановленная сера преобладает в общем содержании серы. Концентрации соединений $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$ в период исследования (2012–2014 гг.) для оз. Нижнее составляли 0,18 %, для оз. Верхнее – 0,12 %. Сравнивая общее содержание восстановленной серы в озере Нижнее с ранее полученными авторами данными по озерам таежной зоны, можно рассматривать их как невысокие. Основной вклад среди этих соединений серы в осадках оз. Нижнее вносит органическая составляющая – в среднем

72,57 % от $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$, далее следуют сульфидные формы – 23,93 % (в том числе $\text{S}_{\text{пирит}}$ – 13,41 % и сера кислоторастворимых сульфидов – 10,52 %) и элементарная сера – 3,50 %; для оз. Верхнее – 84,73 и 14,59 (10,57 и 4,02 %) соответственно, элементарная сера практически отсутствовала. Повышенные значения содержания $\text{S}_{\text{орг}}$ в донных отложениях связаны со значительным вкладом в эту величину серы органических веществ прибрежной и водной растительности.

На основании данных по распределению в донных отложениях сульфатной серы, а также соединений восстановленной серы и соотношению форм в составе $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$ показано, что в южной части оз. Нижнее (наиболее открытой) с самыми прогретыми водами процесс сульфатредукции протекает наиболее активно по сравнению с другими частями акватории водоема. Наиболее выражено эта тенденция проявилась в 2014 г.

Отмечено сезонное изменение интенсивности восстановительных процессов в воде и донных отложениях исследованных озер. Более активно они протекают в летний период в оз. Нижнее, а в оз. Верхнее – в зимний. Среднее содержание соединений восстановленной серы в отложениях оз. Нижнее в марте составляло 0,18 % (от 0,14 до 0,28 %), летом – 0,22 % (от 0,04 до 1,12 %) с заметным увеличением доли сульфидных форм. В оз. Верхнее $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$ в осадках в среднем насчитывала 0,16 %, а летом – 0,10 % с явно выраженным преобладанием органической составляющей в оба сезона.

Установлено, что в донных осадках оз. Нижнее расход органического вещества на восстановление серы составляет в среднем 0,14 %, что более чем в 2 раза превышает его расход на восстановление Fe(III). При этом затраты $\text{C}_{\text{орг}}$ на последний процесс снижаются в несколько раз вниз по разрезу, а восстановление серы требует примерно одинакового количества органических соединений.

Для донных отложений оз. Верхнее средний расход ОВ на образование соединений восстановленной серы составлял 0,09 %, что в 1,5 раза ниже, чем для донных отложений оз. Нижнее, и в 3 раза выше, чем расход органического углерода на восстановление железа.

Результаты исследований процесса сульфатредукции в донных отложениях системы озер Нижнее – Верхнее свидетельствуют о том, что эвтрофирование оз. Нижнее, обусловленное антропогенным воздействием со стороны пгт. Коноша, приводит к более активному протеканию процесса сульфатредукции по сравнению с оз. Верхним. Это выражается

в увеличении содержания соединений именно восстановленной серы в донных осадках, возрастании доли сульфидных форм в их составе. Таким образом, содержание и распределение форм серы можно рассматривать как маркеры антропогенного воздействия.

Авторы благодарят Р. Б. Ивахнову за определение органического углерода и азота в донных отложениях.

Литература

- Анциферова Г. А., Русова Н. И., Шевырев С. Л., Нкурунзиза Р. М., Бурканова О. А., Борисова Л. Е. Трансформация природных водоемов как эталон состояния водных экосистем особо охраняемых и антропогенно-нагруженных территорий // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. 2020. № 4. С. 53–60. doi: 10.17308/geo.2020.4/3065
- Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Водные проблемы Севера и пути их решения // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 35–42.
- Булаев А. Г. Влияние органического источника углерода на биоокисление пирита умеренно-термофильными ацидофильными микроорганизмами // Микробиология. 2020. Т. 89, № 3. С. 315–323. doi: 10.31857/S0026365620030155
- Волков И. И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Волков И. И., Жабина Н. Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // Химический анализ морских осадков / Под ред. Э. А. Остроумова. М.: Наука, 1980. С. 5–27.
- Волков И. И., Соколов В. С., Фомина Л. С. Реакционноспособные формы элементов в осадках трансокеанского профиля // Геохимия диагенеза осадков Тихого океана (трансоеанский профиль). М.: Наука, 1980. С. 6–21.
- Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека / Под ред. акад. Г. К. Скрябина. М.: Наука, 1983. 422 с.
- Кокрятская Н. М., Волков И. И., Демидова Т. П., Мурзина Т. С. Соединения серы и реакционноспособное железо в донных осадках устья Северной Двины // Актуальные проблемы океанологии. М.: Наука, 2003. С. 475–494.
- Кокрятская Н. М., Титова К. В., Жибарева Т. А. Распределение гидрохимических показателей в озере Нижнее (Архангельская область) // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 12(138). С. 1–11. doi: 10.23670/IRJ.2023.138.145
- Кревш А., Кучинскене А. Микробная деструкция органического вещества в донных осадках малых озер урбанизированного ландшафта (Литва) // Микробиология. 2012. Т. 81, № 4. С. 517–523.
- Кревш А., Кучинскене А., Пашкаускас Р. Микробиологическая деструкция органического вещества в донных осадках озер Литвы // Микробиология. 2006. Т. 75, № 2. С. 257–263.
- Кузнецов С. И. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. М.: АН СССР, 1952. 300 с.
- Лазо Ф. И. Геохимия серы в донных отложениях озера Байкал // Геохимия. 1980. № 1. С. 109–115.
- Остроумов Э. А. О формах соединений серы в отложениях Черного моря // Труды Ин-та океанологии АН СССР. 1953. Т. 7. С. 70–90.
- Розанов А. Г., Волков И. И., Кокрятская Н. М., Юдин М. В. Марганец и железо в Белом море: осадконакопление и диагенез // Литология и полезные ископаемые. 2006. № 5. С. 539–558.
- Розанов А. Г., Волков И. И., Соколов В. С. Окислительно-восстановительные процессы. Формы железа и марганца в осадках и их изменение профиля // Геохимия диагенеза осадков Тихого океана (трансоеанский профиль). М.: Наука, 1980. С. 32–35.
- Соколов В. С. Определение реакционноспособных форм железа и марганца в морских осадках // Химический анализ морских осадков / Под ред. Э. А. Остроумова. М.: Наука, 1980. С. 28–41.
- Страхов Н. М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 1976. 159 с.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М. Соединения серы в озерах на территории Кенозерского национального парка (Каргопольский район, Архангельская область) // Вопросы естествознания. Науки о Земле. 2018. № 4(18). С. 67–74.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М. Сульфатредукция в донных отложениях озера Святое (юг Архангельской области) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 1(84). С. 52–56.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А., Захарова Е. Е. Особенности сульфатредукции и накопления соединений восстановленной серы в пресноводном неглубоком озере Назаровское (Архангельская область) // Принципы экологии. 2019. Т. 8, № 4. С. 69–80. doi: 10.15393/j1.art.2019.8722
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А. Процесс сульфатредукции в пресноводных озерах (Белое, Нижнее, Святое) Коношского района Архангельской области // Вестник Московского государственного областного университета. Сер. Естественные науки. 2017. № 4. С. 123–134. doi: 10.18384/2310-7189-2017-4-123-134
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А. Сульфатредукция в воде и донных отложениях озера Белое (Архангельская область) // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 51–61. doi: 10.17076/lim1974
- Фруммин Г. Т., Гильдеева И. М. Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема // Экологическая химия. 2013. № 22(4). С. 191–197.
- Aliff M. N., Reavie E. D., Post S. P., Zanko L. M. Anthropocene geochemistry of metals in sediment cores from the Laurentian Great Lakes // PeerJ. 2020. Vol. 6. Art. 9034. doi: 10.7717/peerj.9034
- Berner R. A. Sedimentary pyrite formation // Am. J. Sci. 1970. Vol. 268. P. 1–23. doi: 10.2475/ajs.268.1.1
- Canfield D. E. Reactive iron in marine sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 1989. Vol. 53. P. 619–632. doi: 10.1016/0016-7037(89)90005-7

Fakhraee M., Li J., Katsev S. Significant role of organic sulfur in supporting sedimentary sulfate reduction in low-sulfate environments // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2017. Vol. 213. P. 502–516. doi: 10.1016/j.gca.2017.07.021

Heredia C., Guedron S., Point D., Perrot V., Campillo S., Verin C., Espinoza M. E., Fernandez P., Duwig C., Achá D. Anthropogenic eutrophication of Lake Titicaca (Bolivia). Revealed by carbon and nitrogen stable isotopes fingerprinting // *Sci. Total Environ.* 2022. Vol. 845. Art. 157286. doi: 10.2139/ssrn.4075852

Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review // *Freshwater Biology*. 2001. Vol. 46, no. 4. P. 431–451.

Jiang M., Sheng Ya., Liua Q., Wang W., Liu X. Conversion mechanisms between organic sulfur and inorganic sulfur in surface sediments in coastal rivers // *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 752. Art. 141829. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141829

Jorgensen B. B. Bacterial sulfate reduction within reduced microniches of oxidized marine sediments // *Mar. Biol.* 1977. Vol. 41. P. 7–17.

La W., Han X., Liu C. Q., Ding H., Liu M., Sun F., Li S., Lang Y. Sulfate concentrations affect sulfate reduction pathways and methane consumption in coastal wetlands // *Water Res.* 2022. Vol. 217. Art. 118441. doi: 10.1016/j.watres.2022.118441

Öztura E., Koç T. Anthropogenically-induced ecological risks in Lake Gala, Thrace, W Turkey // *Int. J. Environ. Geoinformatics*. 2023. No. 10(1). P. 16–27. doi: 10.30897/ijegeo.1181757

Pester M., Knorr K. H., Friedrich M. W., Wagner M., Loy A. Sulfate-reducing microorganisms in wetlands – fameless actors in carbon cycling and climate change // *Frontiers in Microbiology*. 2012. Vol. 3. Art. 72. doi: 10.3389/fmicb.2012.00072

Qian H., Brian J. H. Anthropogenic oligotrophication via liming: long-term phosphorus trends in acidified, limed, and neutral reference lakes in Sweden // *AMBIO*. 2014. Vol. 43. Suppl. 1. P. 104–112. doi: 10.1007/s13280-014-0573-0

Raiswell R., Canfield D. Sources of iron for pyrite formation in marine sediments // *Am. J. Sci.* 1998. Vol. 298. P. 219–245. doi: 10.2475/ajs.298.3.219

Rasigraf O., van Helmond N. A. G. M., Frank J., Lenstra W. K., Matthias E., Slomp C. P., Jetten M. S. Microbial community composition and functional potential in Bothnian Sea sediments is linked to Fe and S dynamics and the quality of organic matter // *Limnol. Oceanogr.* 2020. Vol. 65. P. 113–133. doi: 10.1002/lno.11371

Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Anal. Chem.* 1979. Vol. 51, no. 7. P. 844–851. doi: 10.1021/AC50043A017

Urban N. R., Brezonik P. L., Baker L. A., Sherman L. A. Sulfate reduction and diffusion in sediments of Little Rock Lake, Wisconsin // *Limnol. Oceanogr.* 1994. Vol. 39, no. 4. P. 797–815.

Vandel E., Koff T. Anthropogenically induced changes in the sedimentation processes in the littoral zone of Lake Verevi, South Estonia // *Estonian J. Ecol.* 2011. Vol. 60, no. 3. P. 167–182. doi: 10.3176/eco.2011.3.01

References

Aliff M. N., Reavie E. D., Post S. P., Zanko L. M. Anthropocene geochemistry of metals in sediment cores from the Laurentian Great Lakes. *PeerJ*. 2020;6:9034. doi: 10.7717/peerj.9034

Antsiferova G. A., Rusova N. I., Shevyrev S. L., Nkurunziza R. M., Burkanova O. A., Borisova L. E. Transformation of natural water bodies as a standard for the state of aquatic ecosystems of specially protected and anthropogenically loaded territories. *Vestnik Voronezhskogo gos. universiteta. Ser. Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of Voronezh State University. Ser. Geography. Geoecology*. 2020;4:53–60. (In Russ.). doi: 10.17308/geo.2020.4/3065

Belkina N. A. Role of sediments in the processes of transformation of organic matter and nutrients in lake ecosystems. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Vodnyye problemy Severa i puti ikh resheniya = Transactions of the Karelian Research Centre RAS. Water problems of the North and ways of their solution*. 2011;4:35–42. (In Russ.)

Berner R. A. Sedimentary pyrite formation. *Am. J. Sci.* 1970;268:1–23. doi: 10.2475/ajs.268.1.1

Bulaev A. G. Effect of organic carbon source on pyrite biooxidation by moderately thermophilic acidophilic microorganisms. *Microbiology*. 2020;89(3):301–308. doi: 10.1134/S0026261720030145

Canfield D. E. Reactive iron in marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1989;53:619–632. doi: 10.1016/0016-7037(89)90005-7

Fakhraee M., Li J., Katsev S. Significant role of organic sulfur in supporting sedimentary sulfate reduction in low-sulfate environments. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2017;213:502–516. doi: 10.1016/j.gca.2017.07.021

Frumin G. T., Gil'deeva I. M. Eutrophication of water bodies – a global environmental problem. *Ehko-logicheskaya khimiya = Environmental Chemistry*. 2013;22(4):191–197. (In Russ.)

Heredia C., Guedron S., Point D., Perrot V., Campillo S., Verin C., Espinoza M. E., Fernandez P., Duwig C., Achá D. Anthropogenic eutrophication of Lake Titicaca (Bolivia). Revealed by carbon and nitrogen stable isotopes fingerprinting. *Sci. Total Environ.* 2022;845:157286. doi: 10.2139/ssrn.4075852

Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwat. Biol.* 2001;46(4):431–451.

Jiang M., Sheng Ya., Liua Q., Wang W., Liu X. Conversion mechanisms between organic sulfur and inorganic sulfur in surface sediments in coastal rivers. *Sci. Total Environ.* 2020;752:141829. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141829

Jorgensen B. B. Bacterial sulfate reduction within reduced microniches of oxidized marine sediments. *Mar. Biol.* 1977;41:7–17.

Kokryatskaya N. M., Titova K. V., Zhibareva T. A. Distribution of hydrochemical parameters in Lake Nizhnee (Arkhangelsk Region). *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = Int. Research Journal*. 2023;12(138):1–11. (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2023.138.145

- Kokryatskaya N. M., Volkov I. I., Demidova T. P., Murzina T. S. Sulfur compounds and reactive iron in bottom sediments of the Northern Dvina mouth. *Aktual'nye problemy okeanologii = Topical Issues of Oceanology*. Moscow: Nauka; 2003. P. 475–494. (In Russ.)
- Krevsh A., Kuchinskiene A. Microbial destruction of organic matter in bottom sediments of small lakes of urbanized landscape (Lithuania). *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2012;81(4):517–523. (In Russ.)
- Krevsh A., Kuchinskiene A., Paškauskas R. Microbiological destruction of organic matter in bottom sediments of lakes in Lithuania. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2006;75(2):257–263. (In Russ.)
- Kuznetsov S. I. The role of microorganisms in the circulation of substances in lakes. Moscow: AN SSSR; 1952. 300 p. (In Russ.)
- La W., Han X., Liu C. Q., Ding H., Liu M., Sun F., Li S., Lang Y. Sulfate concentrations affect sulfate reduction pathways and methane consumption in coastal wetlands. *Water Res.* 2022;217:118441. doi: 10.1016/j.watres.2022.118441
- Lazo F. I. Geochemistry of sulfur in bottom sediments of Lake Baikal. *Geokhimiya = Geochemistry*. 1980;1:109–115. (In Russ.)
- Ostroumov E. A. On the forms of sulfur compounds in the sediments of the Black Sea. *Trudy Instituta okeanologii AN SSSR = Proceed. of the Institute of Oceanology of the USSR Academy of Sciences*. 1953;7:70–90. (In Russ.)
- Öztura E., Koç T. Anthropogenically-induced ecological risks in Lake Gala, Thrace, W Turkey. *Int. J. Environ. Geoinformatics*. 2023;10(1):16–27. doi: 10.30897/ijgeo.1181757
- Pester M., Knorr K. H., Friedrich M. W., Wagner M., Loy A. Sulfate-reducing microorganisms in wetlands – fameless actors in carbon cycling and climate change. *Frontiers in Microbiology*. 2012;3:72. doi: 10.3389/fmicb.2012.00072
- Qian H., Brian J. H. Anthropogenic oligotrophication via liming: long-term phosphorus trends in acidified, limed, and neutral reference lakes in Sweden. *AMBIO*. 2014;43(S1):104–112. doi: 10.1007/s13280-014-0573-0
- Raiswell R., Canfield D. Sources of iron for pyrite formation in marine sediments. *Am. J. Sci.* 1998;298:219–245. doi: 10.2475/ajs.298.3.219
- Rasigraf O., van Helmond N. A. G. M., Frank J., Lenstra W. K., Matthias E., Slomp C. P., Jetten M. S. Microbial community composition and functional potential in Bothnian Sea sediments is linked to Fe and S dynamics and the quality of organic matter. *Limnol. Oceanogr.* 2020;65:113–133. doi: 10.1002/lno.11371
- Rozanov A. G., Volkov I. I., Kokryatskaya N. M., Yudin M. V. Manganese and iron in the White Sea: sedimentation and diagenesis. *Litologiya i poleznyye iskopyemye = Lithology and Minerals*. 2006;5:539–558. (In Russ.)
- Rozanov A. G., Volkov I. I., Sokolov V. S. Oxidation-reduction processes. Forms of iron and manganese in sediments and their profile changes. *Geokhimiya diagenеза осадков Тихого океана (transoceanskii profil') = Geochemistry of diagenesis of Pacific Ocean sediments (transoceanic profile)*. Moscow: Nauka; 1980. P. 32–35. (In Russ.)
- Skryabin G. K. (ed.). Global biogeochemical cycle of sulfur and the impact of human activity on it. Moscow: Nauka; 1983. 422 p. (In Russ.)
- Sokolov V. S. Determination of reactive forms of iron and manganese in marine sediments. *Khimicheskii analiz morskikh осадков = Chemical analysis of marine sediments*. Moscow: Nauka; 1980. P. 28–41. (In Russ.)
- Strakhov N. M. Problems of geochemistry of modern oceanic lithogenesis. Moscow: Nauka; 1976. 159 p. (In Russ.)
- Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 1979;51(7):844–851. doi: 10.1021/AC50043A017
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Sulfate reduction in bottom sediments of Lake Svyatoye (south of the Arkhangelsk Region). *Vestnik Irkutskogo gos. tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2014;1(84):52–56. (In Russ.)
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Sulfur compounds in lakes on the territory of the Kenozersky National Park (Kargopol District, Arkhangelsk Region). *Voprosy estestvoznaniya. Nauki o Zemle = Issues of Natural Science. Geosciences*. 2018;4(18):67–74. (In Russ.)
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A. Sulfate reduction in water and sediments of Lake Beloye (Arkhangelsk Region). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025;2:51–61. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1974
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A. Process of sulfate reduction in freshwater lakes (Beloye, Nizhneye, Svyatoye) of Konosh District of the Arkhangelsk Region. *Vestnik Moskovskogo gos. oblastnogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki = Bulletin of Moscow Region State University. Natural Sciences*. 2017;4:123–134. (In Russ.). doi: 10.18384/2310-7189-2017-4-123-134
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A., Zakharova E. E. Features of sulfate reduction and accumulation of reduced sulfur compounds in the freshwater shallow Lake Nazarovskoye (Arkhangelsk Region). *Printsipy ekologiy = Principles of Ecology*. 2019;8(4):69–80. (In Russ.). doi: 10.15393/j1.art.2019.8722
- Urban N. R., Brezonik P. L., Baker L. A., Sherman L. A. Sulfate reduction and diffusion in sediments of Little Rock Lake, Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.* 1994;39(4):797–815.
- Vandel E., Koff T. Anthropogenically induced changes in the sedimentation processes in the littoral zone of Lake Verevi, South Estonia. *Estonian J. Ecol.* 2011;60(3):167–182. doi: 10.3176/eco.2011.3.01
- Volkov I. I. Geochemistry of sulfur in ocean sediments. Moscow: Nauka; 1984. 272 p. (In Russ.)
- Volkov I. I., Sokolov V. S., Fomina L. S. Reactive forms of elements in sediments of the transoceanic profile. *Geokhimiya diagenеза осадков Тихого океана (transoceanskii profil') = Geochemistry of diagenesis of Pacific Ocean sediments (transoceanic profile)*. Moscow: Nauka; 1980. P. 6–21. (In Russ.)
- Volkov I. I., Zhabina N. N. Methods for determining various sulfur compounds in marine sediments. *Khimicheskii analiz morskikh осадков = Chemical analysis of marine sediments*. Moscow: Nauka; 1980. P. 5–27. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Титова Ксения Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник
лаборатории экоаналитических исследований

e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Кокрятская Наталья Михайловна

канд. геол.-мин. наук, заведующая лабораторией
экоаналитических исследований

e-mail: nkokr@yandex.ru

Жибарева Татьяна Александровна

младший научный сотрудник лаборатории
экоаналитических исследований

e-mail: ostrivok.vi_nt@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Titova, Ksenia

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Kokryatskaya, Natalia

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

Zhibareva, Tatiana

Junior Researcher

УДК 550.42:504.455

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЕР БАСЕЙНА РЕКИ ИРТЫШ НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛТАВСКОГО РАЙОНА ОМСКОЙ ОБЛАСТИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

А. Н. Королёв*, С. Б. Ловинецкая

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)
(пр. Мира, 5, Омск, Россия, 644080), *korolev66.66@mail.ru*

Представлены результаты гидрохимических исследований девяти малых озер, расположенных на территории Полтавского муниципального района Омской области, и оценка их экологического состояния. Исследованные водоемы – это небольшие водные объекты природного происхождения. Отбор проб воды производился однократно в июне–июле 2019 г. В ходе экспедиционных работ и лабораторных исследований использовались физико-химический, морфометрический и математико-статистический методы. Установлено, что вода в исследованных озерах обладает нейтральной и слабощелочной реакцией среды (рН 6,47–8,46). Все водоемы по содержанию катионов и анионов относятся к трем классам (сульфатному, хлоридному, гидрокарбонатному) и трем группам. Минерализация находится в пределах 278,8–1070,0 мг/л. По сумме солей вода исследованных озер относится к пресной. Преобладающим типом жесткости является карбонатная; вода характеризуется как жесткая и умеренно жесткая (3,4–7,4 мг-экв/л). Перманганатная окисляемость вод колеблется в пределах от 10,3 до 22,6 мг О/л, что свидетельствует о загрязнении водоемов легкоокисляемыми органическими и неорганическими веществами. Присутствие значительного количества ионов аммония в воде озер Караката, Колесникова Балка, Мокрое, Ситное, Камышовое свидетельствует о попадании органических загрязнителей (фекальные стоки, органические удобрения и др.) в данные источники. В большинстве озер вода обогащена ионами марганца, что является геохимической особенностью водных объектов данного региона. Содержание Mn в воде оз. Мокрое превышает 10,0 мг/л, что в 100 раз больше ПДК для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования и в 1000 раз – ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения.

Ключевые слова: гидрохимия; Омская область; минерализация; жесткость воды; класс воды; тяжелые металлы

Для цитирования: Королёв А. Н., Ловинецкая С. Б. Гидрохимические особенности озер бассейна реки Иртыш на территории Полтавского района Омской области в летний период // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 58–71. doi: 10.17076/lim2393

A. N. Korolev*, S. B. Lovinetskaya. HYDROCHEMICAL FEATURES OF LAKES IN THE IRTYSH RIVER CATCHMENT WITHIN THE POLTAVA DISTRICT, OMSK REGION, IN THE SUMMER

*Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (5 Mira Ave., 644080 Omsk, Russia), *korolev66.66@mail.ru*

The findings of hydrochemical surveys conducted at nine lakes situated within the Poltavsky Municipal District of the Omsk Region are outlined. The aim was to evaluate the chemical composition of the smaller lakes within the district and determine their ecological status. Water sampling was done only once, in June – July 2019. The lakes are small bodies of water of natural origin. A range of physicochemical, morphometric, and mathematical statistics techniques were applied in the field and in the subsequent laboratory treatments. The water in the sampled lakes had a neutral to slightly alkaline reaction (pH 6.47–8.46). In terms of cation and ion content, the water bodies fall into 3 categories (sulfate, chloride, and bicarbonate) and 3 groups. Total dissolved solids were between 278.8 and 1070.0 mg/L. The water is classified as sweet according to its salt content. Hardness is mostly of the carbonate type, ranging from moderately hard to hard (3.4–7.4 $\mu\text{Eq/L}$). The permanganate index varies from 10.3 to 22.6 mg O/L, indicating contamination with readily oxidizable organic and inorganic substances. Significant concentrations of ammonium ions in lakes Karakata, Kolesnikova Balka, Mokroye, Sitnoye, and Kamyshevoye signal an influx of organic pollutants (fecal sewage, organic fertilizers, etc.) into these water sources. Water in most of the lakes is enriched in manganese ions, consistent with the geochemical characteristics of the aquatic systems in this geographical area. Notably, Mn concentration in Lake Mokroye is over 10.0 mg/L, thus exceeding the maximum permissible concentration (MPC) for household and municipal water use by a factor of 100, and the MPC for fishery water bodies by a factor of 1000.

Keywords: hydrochemistry; Omsk Region; TDS; water hardness; water class; heavy metals

For citation: Korolev A. N., Lovinetskaya S. B. Hydrochemical features of lakes in the Irtysh river catchment within the Poltava District, Omsk Region, in the summer. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 58–71. doi: 10.17076/lm2393

Введение

Водоемы играют важную роль: формируют микроклимат территории, поддерживают уровень грунтовых вод, сохраняют флору и фауну. Они имеют комплексное значение, и помимо разнообразных хозяйственных функций важна их природоохранная, эстетическая и рекреационная роль [Макаренко, 2013]. Характеризуясь значительно более низкими темпами водообмена по сравнению с реками, локальные водоемы демонстрируют существенные вариации в химическом составе воды. Эти различия проявляются даже при идентичных климатических и геохимических факторах, обусловленных замедленным перемещением водной массы.

Существующие гидрохимические исследования поверхностных вод часто носят локальный характер и посвящены отдельным водным объектам. В то же время системный мониторинг качества поверхностных вод, как правило,

ориентирован на решение практических задач, таких как контроль загрязнения водоемов, используемых в хозяйственной деятельности, для питьевого водоснабжения и подверженных влиянию сточных вод. Однако гидроресурсы водных объектов, используемых в рекреационных целях, в частности гидроресурсы болот и озер, расположенных на отдельных территориях, до сих пор остаются менее изученными [Фоменко, 2013].

Озера выступают в роли чувствительных индикаторов техногенной нагрузки. Анализ степени загрязнения поверхностных вод озер предоставляет информацию о текущем состоянии экосистемы в контексте хозяйственной деятельности [Агбалян, Шинкарук, 2015]. Кроме того, изучение озер в пределах одного ландшафта дает возможность уделить внимание изменчивости параметров в небольшом географическом масштабе. Любое вмешательство человека нарушает природный баланс в озере, влияя как на живые организмы, так и на неживую среду.

Это влечет за собой ускоренное накопление донных отложений, уменьшение глубины водоемов, их зарастание растительностью и загрязнение [Руфова, Татарина, 2015].

Изучению экологического состояния природных водоисточников на территории Омской области посвящены ряд работ [Баженова и др., 2012; Невенчанная, 2014; Баженова, 2015, 2017; Королев, Тымань, 2017а, б; Кренц, Баженова, 2017; Королев, Лейнвебер, 2018], тем не менее сведений о гидрохимических показателях малых водоемов Омской области недостаточно.

Цель настоящей работы – исследование химического состава вод малых озер на территории Полтавского муниципального района Омской области и оценка их современного экологического состояния.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись 9 водоемов на территории Полтавского муниципального района (МР) Омской области, относящихся к малым озерам лесостепной и степной зон бассейна р. Иртыш (рис.).

Омская область относится к бассейну р. Иртыш. На территории присутствует значительное количество водных источников. Общее число рек превышает 4 тысячи, а озер – 16 тысяч [Есипова и др., 2017; Храмцов и др., 2020]. Особое место среди них занимают реликтовые озера с лечебными грязями, которые признаны природными памятниками [Проблемы...].

На территории Полтавского МР Омской области сосредоточено более 20 водоемов как естественного [Перечень...], так и антропогенного происхождения, часть из которых используются в целях рекреации, а часть в настоящее время не используются, но в будущем могут быть задействованы в рекреационных целях в связи с интенсивным развитием сельского и лечебно-оздоровительного туризма. Особенностью водоемов является образование на их дне минеральных грязей и сапропеля различного состава [Ресурсы..., 1964; Омская..., 2005].

На основании анализа морфометрических характеристик исследованные водоемы были определены как малые озера. Это небольшие водные объекты природного происхождения с площадью водного зеркала от 0,082 до 0,374 км² (8,2–37,4 га), по происхождению либо реликтовые озера древних долин и котловин, либо суффузионно-просадочные озера котловин. Озера располагаются в больших плоских котловинах-блюдцах, зеркало воды в которых окружено узкой полоской солончаков.

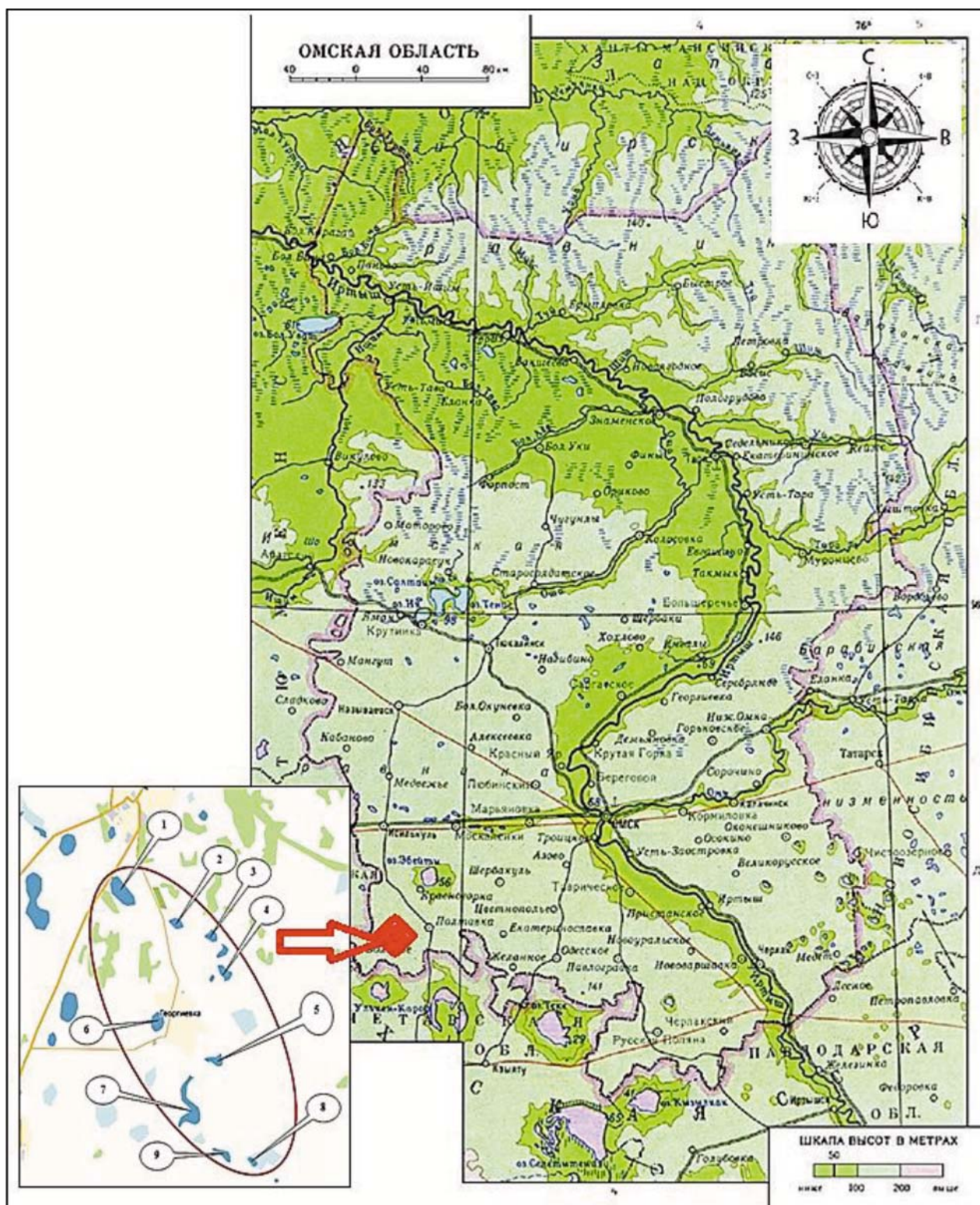
Грунтовые воды находятся на небольшой глубине. Большей частью они имеют высокую минерализацию [Лизунов, 2013]. Характер питания обычно смешанный и представлен как талыми водами и атмосферными осадками, так и осуществляется за счет грунтовых вод. Наличие воды в водоемах круглый год обеспечено особенностями геологического строения территории их расположения. На исследованном участке выявлены следующие водоносные горизонты и комплексы:

- относительно водоупорный средне-верхнемиоценовый горизонт (N_1^{2-1}): развит повсеместно, залегает на глубине примерно 10–30 м, водовмещающие породы – пески с прослоями суглинков, супесей, глин, прослои и линзы песков, алевритов, скопления известково-мергелистых конкреций, отмечаются увеличенные концентрации железа, марганца, нитратов [Зылева и др., 2020];

- относительно водоносные горизонты водораздельных равнин (Ia/Q_{E-III}): занимают небольшой участок на данной территории, залегают на глубине 50–80 м, водовмещающие породы – пески с прослоями суглинков, супесей и глин [Балобаненко, 2018; Экологический..., 2022].

Толстые слои водоупорных глин предотвращают фильтрацию воды в нижние слои. Большинство из исследованных водоемов в настоящее время имеют либо рекреационное назначение, либо используются населением для отдыха, ловли рыбы, несанкционированного выпаса скота. При оценке экологического состояния прибрежных областей исследуемых водоемов установлено, что берега и прибрежные земельные участки вокруг большинства водоемов имеют антропогенное загрязнение (в основном бытовой мусор, представленный ПЭТ-пакетами и бутылками, металлическая тара, бумага, строительные материалы). Краткая характеристика водоемов на территории Полтавского МР Омской области приведена в табл. 1.

Отбор проб воды на химический анализ проводился в соответствии с программой исследования в июне–июле 2019 г. однократно согласно ГОСТ 17.1.3.07-82 (актуализ. 01.07.2023), ГОСТ 17.1.5.04-81 (актуализ. 01.07.2023), ГОСТ Р 59024-2020. В каждом водоеме ручным методом отобрано по пять точечных проб (четыре – в соответствии со сторонами света на расстоянии 10 м от берега и одна – в центре водоема) в пластиковые бутылки, промытые раствором соляной кислоты (для проб, предназначенных для анализа на содержание тяжелых металлов, – 10% раствором азотной кислоты), которые затем ополаскивались 10–20 раз обычной и 3 раза дистиллированной водой.



Карта-схема исследованных водных объектов, расположенных на территории Полтавского района Омской области:

1 – оз. Караката, 2 – оз. Колесникова Балка, 3 – оз. Бисембаево, 4 – оз. Широкое, 5 – оз. Мужимпаево, 6 – оз. Писарское, 7 – оз. Мокрое, 8 – оз. Ситное, 9 – оз. Камышовое

Schematic map of the studied water bodies located on the territory of the Poltavsky District of the Omsk Region:

1 – Lake Karakata, 2 – Lake Kolesnikova Balka (ravine), 3 – Lake Bisembayev, 4 – Lake Shirokoye, 5 – Lake Muzhimpayev, 6 – Lake Pisarskoye, 7 – Lake Mokroye, 8 – Lake Sitnoye, 9 – Lake Kamyshovoye

Таблица 1. Характеристика водоемов Полтавского МР Омской области

Table 1. Description of the water bodies in the Poltavsky District of the Omsk Region

Наименование озера. Место расположения Lake name. Location	S, км²/га km²/ha	Характер питания Type of water recharge	Назначение Use	Характер загрязнения Type of pollution
Караката Karakata (54.33°N, 71.74°E)	<u>0,374</u> 37,4	смешанный mixed	рекреационное recreational	антропогенный man-induced
Колесникова Балка Kolesnikova Balka (54.32°N, 71.77°E)	<u>0,093</u> 9,3	«	«	«
Бисембаево Bisembaevo (54.31°N, 71.78°E)	<u>0,082</u> 8,2	«	«	«
Широкое, с. Георгиевка Shirokoye, village of Georgievka (54.29°N, 71.80°E)	<u>0,113</u> 11,3	«	не имеет (случайный выпас домашнего скота) no (occasional livestock grazing)	сток с полей, выпас и водопой скота, сточные воды с/х предприятий runoff from fields, livestock grazing and watering, sewage from agricultural enterprises
Мужимпаево, с. Георгиевка Muzhimpaevo, village of Georgievka (54.28°N, 71.79°E)	<u>0,084</u> 8,4	«	«	«
Писарское Pisarskoye (54.27°N, 71.78°E)	<u>0,297</u> 29,7	«	рекреационное recreational	антропогенный (сток с полей) man-induced (runoff from fields)
Мокрое Mokroye (54.26°N, 71.79°E)	<u>0,163</u> 16,3	«	не имеет (случайный выпас домашнего скота) no (occasional livestock grazing)	«
Ситное Sitnoye (54.26°N, 71.81°E)	<u>0,134</u> 13,4	«	рекреационное recreational	«
Камышовое Kamyshovoye (54.29°N, 71.76°E)	<u>0,219</u> 21,9	«	не имеет (случайный выпас домашней птицы) no (occasional poultry grazing)	«

Перед отбором проб воды бутылки обязательно ополаскивались 2–3 раза водой изучаемого озера. Пробы отбирались ручным батометром с одного горизонта (глубина погружения 1,0 м). Образцы объединялись, усреднялись и далее подвергались исследованию. Такой подход позволяет охарактеризовать средние свойства проб. Способы консервации и условия хранения проб для определения физико-химических и химических показателей выполнены в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020.

В аккредитованных лабораториях (Испытательная лаборатория (центр) ООО «МИ-Транс»; Центральная учебно-научная лаборатория аграрно-технологических исследований ФГБОУ ВО Омский ГАУ) проведен физико-химический анализ воды по общепринятым методикам: pH – потенциометрически (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97),

хлориды – аргентометрическим методом (ПНД Ф 14.1:2:3.96-97), сульфаты – турбидиметрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.159-2000), общее железо – фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой (ПНД Ф 14.1:2:4.50-96), нитрит-ионы – фотометрическим методом с реактивом Грисса (ПНД Ф 14.1:2:43-95), нитрат-ионы – фотометрическим методом с салициловой кислотой (ПНД Ф 14.1:2.4-95), сухой остаток – гравиметрическим методом (ПНД Ф 14.1:2:4.261-10), перманганатная окисляемость – титриметрически (ПНД Ф 14.1:2:4.154-99), жесткость – комплексонометрическим методом (ПНД Ф 14.1:2:3.98-97), валовое содержание тяжелых металлов и микроэлементов – методом ААС с электротермической атомизацией (РД 52.24.377-95, ПНДФ 14.1:2:4.140-98). Результаты сравнивались с ПДК [СанПиН 1.2.3685-21;

Приказ..., 2025]. Статистическая обработка данных включала расчет среднего арифметического значения и стандартной ошибки среднего и проводилась с помощью программного обеспечения StatSoft, Inc. (2011) Statistica (data analysis software system), version 10. Полученные в ходе исследования данные легли в основу предварительной оценки текущего состояния водных объектов, определяемого по наличию в них некоторых химических элементов.

Результаты и обсуждение

Согласно химическим исследованиям, вода большинства изученных озер имеет pH в диапазоне 6,47–7,60, что указывает на ее близкую к нейтральной реакцию. И лишь в оз. Караката воду можно отнести к слабощелочной (pH составлял 8,46). При этом содержание основных катионов (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), микроэлементов (Fe^{2+} , Fe^{3+}) и анионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^-) не превышало ПДК_{ХПВ} и ПДК_{КБВ} (табл. 2). Содержание иона NH_4^+ в большинстве исследованных водоемов превышало ПДК_{РБХЗ} (исключение – оз. Мужимпаево).

Присутствие значительных количеств ионов аммония (NH_4^+) в воде озер Караката (1,04 мг/л – 2,08 ПДК_{РБХЗ}), Колесникова Балка (1,18 мг/л – 2,36 ПДК_{РБХЗ}), Мокрое (3,24 мг/л – 2,16 ПДК_{ХПВ, КБВ} и 6,48 ПДК_{РБХЗ}), Ситное (4,8 мг/л – 3,2 ПДК_{ХПВ, КБВ} и 9,6 ПДК_{РБХЗ}), Камышовое (1,26 мг/л – 2,52 ПДК_{РБХЗ})

свидетельствует как об аллохтонном поступлении соединений азота извне (попадание органических загрязнителей – фекальных стоков, органических удобрений и др.), так и об автохтонном образовании ионов аммония непосредственно в самом водоеме. Оба процесса в исследованных водоемах не исключены: 1) практически все водоемы используются для водопоя при несанкционированном выпасе скота (сопровождается попаданием в воду фекалий животных)); 2) в процессе сапропелеобразования, что характерно для водоемов юга Западной Сибири [Мальцев, 2017; Мальцев и др., 2019], в придонных слоях при сильном истощении растворенного кислорода микроорганизмы могут использовать другие акцепторы электронов помимо кислорода. В таких ситуациях конечными продуктами разложения органики могут быть в том числе ионы аммония [Лозовик, 2011].

Вода в водоемах Полтавского МР обогащена анионами SO_4^{2-} и Cl^- (табл. 3). Содержание нитрат- и нитрит-ионов (NO_3^- , NO_2^-) во всех обследованных водоемах существенно ниже санитарно-гигиенических нормативов [СанПиН 1.2.3685-21; Приказ..., 2025]. Однако высокая концентрация ионов аммония в ряде водоемов при сохранении нормативных показателей содержания нитратов и нитритов является критическим фактором, требующим мониторинга для предотвращения развития неблагоприятных экологических процессов.

Таблица 2. Содержание основных катионов и аммония в водоемах Полтавского муниципального района Омской области, мг/л

Table 2. Content of basic cations and ammonium in the water bodies of the Poltavsky District of the Omsk Region, mg/L

Наименование озера Lake	Катионы / Cations			
	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	NH_4^+
Караката / Karakata	321,7	53,5	20	1,04
Колесникова Балка / Kolesnikova Balka	127,0	43,8	36	1,18
Бисембаево / Bisembaevo	89,6	43,8	32	0,6
Широкое / Shirokoye	73,1	24,3	28	0,84
Мужимпаево / Muzhimpaevo	13,3	31,6	32	0,02
Писарское / Pisarskoye	75,4	34,1	36	0,98
Мокрое / Mokroye	32,5	65,7	40	3,24
Ситное / Sitnoye	38,6	19,5	36	4,8
Камышовое / Kamyshovoye	18,7	41,3	36	1,26
ПДК _{ХПВ} / MPC _{HDW}	Na^+ 200 K^+ 180	100	200	1,5
ПДК _{КБВ} / MPC _{CDW}				0,5
ПДК _{РБХЗ} / MPC _{FI}	Na^+ 120 K^+ 50			

Примечание. Здесь и в табл. 3, 5, 6: ПДК_{ХПВ} – хозяйственно-питьевое водопользование, ПДК_{КБВ} – культурно-бытовое водопользование [СанПиН 1.2.3685-21]; ПДК_{РБХЗ} – водные объекты рыбохозяйственного значения в соответствии с [Приказ..., 2025].

Note. Here and in Tables 3, 5, 6: MPC_{HDW} – economic and drinking water use, MPC_{CDW} – cultural and domestic water use after [SanPiN 1.2.3685-21]; MPC_{FI} – water bodies of fishery importance in accordance with Order of the Rosrybolovstvo no. 296 dated 05/26/2025.

Таблица 3. Содержание основных анионов в водоемах Полтавского муниципального района Омской области, мг/л
Table 3. Content of basic anions in the water bodies of the Poltavsky District of the Omsk Region, mg/L

Наименование озера Lake	Анионы / Anions				
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
Караката / Karakata	190,4	176,1	296	12,4	–
Колесникова Балка / Kolesnikova Balka	556,5	764,7	462	13,6	0,02
Бисембаево / Bisembaevo	156,2	96,6	153	8,4	–
Широкое / Shirokoye	332	136,7	199	17,4	–
Мужимпаево / Muzhimpaevo	449,1	378,8	918	15,2	0,02
Писарское / Pisarskoye	136,7	88,4	129	4	0,01
Мокрое / Mokroye	234,3	155,5	454	8,4	–
Ситное / Sitnoye	356,4	888,9	1134	11	0,01
Камышовое / Kamyshovoye	229,4	147	404	5,8	0,01
*ПДК _{ХЛВ} / MPC _{HDW}	1000	350	500	45	3,0
ПДК _{КБВ} / MPC _{CDW}		300	100	40	0,08
ПДК _{РБВ} / MPC _{FI}					

Примечание. Здесь и в табл. 6: (–) – не обнаружено.

Note. Here and in Table 6: (–) – not found.

Используя классификацию О. А. Алекина [1970], исследованные водоемы по преобладающим катионам и анионам можно отнести к трем классам (сульфатному, хлоридному, гидрокарбонатному) и к трем группам (натриевая, магниевая и кальциевая). В табл. 4 представлены ионные формулы воды по М. Г. Курлову [Матевосян, 2021]. Данная особенность обусловлена тем, что подстилающие горные породы на территории Полтавского МР Омской области в основном представлены переуплотненными глинами, обогащенными мирабилитом и хлоридами [Общее...].

Минерализация вод исследованных озер находится в пределах 278,8–1070 мг/л. Наибольшей минерализацией обладает вода в оз. Караката (1070 мг/л), наименьшей – вода оз. Мужимпаево (278,8 мг/л). Несмотря на то что минерализация достаточно высокая, она не превышает ПДК_{ХЛВ, КБВ} (табл. 5). По сумме солей вода в озерах Бисембаево, Широкое, Мужимпаево, Писарское, Мокрое, Ситное, Камышовое относится к категории пресных природных вод, а вода в озерах Караката, Колесникова Балка – к категории вод с повышенной минерализацией.

Таблица 4. Химический состав воды в водоемах Полтавского муниципального района Омской области (по Курлову)

Table 4. Chemical composition of water in the water bodies of the Poltavsky District of the Omsk Region (according to Kurlov)

Наименование озера Lake	Формула Курлова, %-экв. Kurlov's formula, %-eq.	Класс и группа воды Water class and group
Караката / Karakata	$M_{1,1} \frac{SO_4^{2-} 43 Cl^- 35 HCO_3^- 22}{Na^+ 72 Mg^{2+} 23 Ca^{2+} 5} pH 8,46$	сульфатный, натриевая sulfate, sodium
Бисембаево / Bisembaevo	$M_{0,5} \frac{SO_4^{2-} 37 Cl^- 33 HCO_3^- 30}{Na^+ 43 Mg^{2+} 40 Ca^{2+} 17} pH 7,49$	
Писарское / Pisarskoye	$M_{0,4} \frac{SO_4^{2-} 36 Cl^- 34 HCO_3^- 30}{Na^+ 41 Mg^{2+} 36 Ca^{2+} 23} pH 6,82$	
Мужимпаево / Muzhimpaevo	$M_{0,3} \frac{SO_4^{2-} 51 Cl^- 29 HCO_3^- 20}{Mg^{2+} 54 Ca^{2+} 34 Na^+ 12} pH 7,3$	сульфатный, магниевая sulfate, magnesium
Мокрое / Mokroye	$M_{0,5} \frac{SO_4^{2-} 53 Cl^- 25 HCO_3^- 22}{Mg^{2+} 61 Ca^{2+} 23 Na^+ 16} pH 6,64$	
Камышовое / Kamyshovoye	$M_{0,3} \frac{SO_4^{2-} 51 Cl^- 26 HCO_3^- 23}{Mg^{2+} 56 Ca^{2+} 30 Na^+ 14} pH 6,65$	
Ситное / Sitnoye	$M_{0,3} \frac{Cl^- 46 SO_4^{2-} 43 HCO_3^- 11}{Ca^{2+} 35 Na^+ 33 Mg^{2+} 32} pH 6,47$	хлоридный, кальциевая chloride, calcium
Колесникова Балка / Kolesnikova Balka	$M_{0,6} \frac{Cl^- 53 SO_4^{2-} 24 HCO_3^- 23}{Na^+ 51 Mg^{2+} 33 Ca^{2+} 16} pH 7,6$	хлоридный, натриевая chloride, sodium
Широкое / Shirokoye	$M_{0,4} \frac{HCO_3^- 41 SO_4^{2-} 30 Cl^- 29}{Na^+ 48 Mg^{2+} 30 Ca^{2+} 22} pH 7,35$	гидрокарбонатный, натриевая bicarbonate, sodium

Таблица 5. Гидрохимические показатели водоемов территории Полтавского муниципального района Омской области

Table 5. Hydrochemical indicators of the water bodies in the Poltavsky District of the Omsk Region

Наименование озера Lake	pH	Сухой остаток, мг/л Dry residue, mg/L	Окисляемость перманганатная, мг О/л Oxidizability permanganate, mg O/L	Жесткость, мг-экв/л Hardness, $\mu\text{Eq/L}$	
				общая general	карбонатная carbonate
Караката / Karakata	8,46	1070	19,57	5,4	5,4
Колесникова Балка Kolesnikova Balka	7,60	615,3	20,6	5,4	5,4
Бисембаево / Bisembaevo	7,49	501,9	22,6	5,2	4,72
Широкое / Shirokoye	7,35	372,5	15,45	3,4	2,64
Мужимпаево / Muzhimpaevo	7,3	278,8	12,36	4,2	1,68
Писарское / Pisarskoye	6,82	429,6	12,36	4,6	3,44
Мокрое / Mokroye	6,64	485,2	16,48	7,4	3,2
Ситное / Sitnoye	6,47	300,6	10,3	3,4	2,24
Камышовое / Kamyshevoye	6,65	322,8	13,39	5,2	2,72
ПДК _{ХПВ} / МРС _{НДВ}	6,8–8,3	1000–1500	5	7	
ПДК _{КБВ} / МРС _{СДВ}			30	10	
ПДК _{РБХЗ} / МРС _{РЛ}	6,5–8,5	не нормируются / they are not standardized			

Перманганатная окисляемость вод находится в пределах от 10,3 мг О/л (оз. Ситное) до 22,6 мг О/л (оз. Бисембаево). Высокий уровень перманганатной окисляемости указывает на загрязнение воды легкоокисляемыми органическими веществами вследствие как антропогенного воздействия (например, сток с полей, выпас и водопой скота), так и естественных процессов (сток с заболоченной водосборной территории, процессы сапротелеобразования). Такие воды пригодны только для хозяйственно-бытовых нужд, поскольку показатель отражает присутствие в воде как органических загрязнителей, так и окисляемых неорганических соединений (соли Fe^{2+} , нитриты, сероводород).

Жесткость, являющаяся ключевым параметром природной воды, обусловлена преимущественно присутствием катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} . Данные исследований свидетельствуют о том, что вода в большинстве озер относится к категории умеренно жесткой (от 3,4 до 5,4 мг-экв/л) и лишь вода в оз. Мокрое относится к категории жесткой (7,4 мг-экв/л). Преобладающим типом жесткости является карбонатная (табл. 5).

В ходе проведенного исследования обнаружен кадмий (Cd) в воде оз. Караката в количестве 0,3 мкг/л (не превышает ПДК_{ХПВ}, ПДК_{КБВ}, ПДК_{РБХЗ}), а также в воде оз. Колесникова Балка – 1,2 мкг/л, что превышает ПДК_{ХПВ}, ПДК_{КБВ} в 1,2 раза. В большинстве озер в следовых количествах (менее 5 мкг/л) обнаружены никель (Ni) и хром (менее 2,5 мкг/л). Лишь в воде оз. Мокрое валовое содержание Cr составило

32 мкг/л, однако данная величина не превышает ПДК_{ХПВ}, ПДК_{КБВ}, ПДК_{РБХЗ} (табл. 6).

Наиболее неблагоприятная экологическая обстановка в воде исследованных озер складывается по содержанию марганца (Mn). Валовое содержание данного элемента в воде оз. Мокрое составляет более 10 000 мкг/л, что в 100 раз превышает ПДК_{ХПВ}, ПДК_{КБВ} и в 1000 раз – ПДК_{РБХЗ}. Также существенное превышение ПДК по марганцу установлено в водах озер Колесникова Балка – 422 мкг/л (в 4,2 раза выше ПДК_{ХПВ}, ПДК_{КБВ} и в 42,2 раза выше ПДК_{РБХЗ}), Ситное – 968 мкг/л (в 9,7 раза выше ПДК_{ХПВ}, ПДК_{КБВ}), Камышовое – 659 мкг/л (в 6,6 раза выше ПДК_{ХПВ}, ПДК_{КБВ}).

На сегодняшний день в официальных источниках нет достоверных сведений об аномальных зонах в почвах и подстилающих горных породах региона, содержащих значительные количества марганца. Также на территории отсутствуют техногенные источники поступления марганца в объекты окружающей среды. Поэтому характер кумулятивного накопления элемента можно обосновать следующими причинами. На основании сведений о гидрогеологической изученности известно, что территория Павлоградского МР в гидрогеологическом отношении приурочена к толще мезозойско-кайнозойских отложений (верхнемеловой-миоценовый водоносный комплекс), характеризующихся залеганием соленых вод с высокой минерализацией и увеличенной концентрацией железа, марганца, нитратов [Зылева и др., 2020]. Этим может быть обусловлен радиальный тип миграции марганца в результате

Таблица 6. Валовое содержание тяжелых металлов и микроэлементов в водоемах Полтавского муниципального района Омской области, мкг/л

Table 6. Gross content of heavy metals and trace elements in the water bodies of the Poltavsky District of the Omsk Region, mcg/L

Наименование озера Lake	Элементы / Elements							
	Pb	Cd	Cu	Ni	Cr	Mn	Fe ²⁺	Fe ³⁺
Караката / Karakata	–	0,3 ± 0,1	–	< 5,0	< 2,5	7,0 ± 1,0	–	–
Колесникова Балка Kolesnikova Balka	–	1,2 ± 0,2	–	5,5 ± 0,2	< 2,5	422 ± 68	100	100
Бисембаево / Bisembaevo	–	–	–	1,5 ± 0,3	< 2,5	7 ± 1	–	–
Широкое / Shirokoye	–	–	–	< 5,0	< 2,5	3 ± 1	40	60
Мужимпаево / Muzhimpaevo	–	–	–	< 5,0	< 2,5	10 ± 2	–	–
Писарское / Pisarskoye	–	–	–	< 5	< 2,5	17 ± 3	–	–
Мокрое / Mokroye	–	–	–	< 5	32 ± 6,4	>10000	100	100
Ситное / Sitnoye	–	–	–	< 5	< 2,5	968 ± 155	–	–
Камышовое / Kamyshovoye	–	–	–	< 5	< 2,5	659 ± 105	–	–
ПДК _{ХПВ} , ПДК _{КБВ} МРС _{НДВ} , МРС _{СДВ}	10	1	1000	20	50	100	300	
ПДК _{РБХЗ} / МРС _{FI}	6	5	1	10	70/20**	10	100	
Кларк речной воды* Clark of river water*	1	0,2	7	2,5	1	10	40	

Примечание. *Кларк речной воды [Архипов и др., 1990]; **Cr³⁺/Cr⁶⁺.

Note. *Clark of river water [Arkhipov et al., 1990]; **Cr³⁺/Cr⁶⁺.

поднятия грунтовых вод (что характерно для региона). Кроме того, сапропели, которыми повсеместно богаты озера Павлоградского МР, относятся к кремнеземистому типу и в своем составе кроме макроэлементов в минеральной компоненте содержат микроэлементы (мг/кг): марганец (117–873), хром (4,03–39,8), никель (9,36–25,6), цинк (23,4–75,4), кадмий (0,20–0,82), молибден (0,29–1,37), кобальт (3,52–13,1), медь (8,36–18,7) и в следовых количествах селен, олово, стронций, иттрий, рубидий, титан, бром, хлор, цезий, бериллий, скандий, свинец, вольфрам [Плаксин и др., 2012]. Накопление сапропелевых отложений является характерной чертой малых озер умеренных широт, в том числе юга Западной Сибири, где физико-географические условия благоприятны для сапропелеобразования [Мальцев, 2017; Мальцев и др., 2019]. При усилении деструкции органического вещества в верхнем слое отложений понижается их pH и растворяется часть карбонатов Mn. При этом Mn (II) поступает в поровый раствор, откуда переходит в воду [Мартынова, 2012].

Изменение окислительно-восстановительного потенциала, pH, солевого состава может оказать влияние на радиальную миграцию марганца в системе «донные отложения – поровый раствор – вода – донные отложения». Установлено, что в зависимости от гидрологического сезона в нем могут преобладать либо

окислительные (Eh > 0), либо восстановительные (Eh < 0) условия, которые определяют форму нахождения металлов [Давыдова и др., 2016]. Окислительные условия в водной экосистеме преобладают в весенний период, когда наблюдается повышенное содержание растворенного кислорода в воде. В летне-осеннее время за счет понижения концентрации растворенного кислорода и его интенсивного расходования на биохимические процессы в поверхностном слое донных отложений могут устанавливаться восстановительные условия. Рядом авторов достоверно установлено, что при повышении pH водной среды до 8,15 в осенний период возрастает миграция и накопление большинства металлов из воды в донные отложения [Коровина и др., 2016]. И напротив, в водных экосистемах с уменьшением pH среды происходит десорбция катионных форм металлов с поверхности твердых частиц взвешенных веществ или донных отложений и поступление их в воду. При pH < 8 даже в случае высоких концентраций Mn его осаждение из раствора происходит крайне медленно и только при участии Mn-окисляющих микроорганизмов [Мартынова, 2012]. Помимо влияния pH на распределение металлов между компонентами в водных экосистемах следует рассматривать влияние гидрокарбонат-ионов природной воды. Последние характеризуют карбонатную жесткость воды.

Согласно [Государственная..., 2008], процессу заболачивания способствует неглубокое залегание плотных неогеновых глин и затрудненный сток поверхностных и грунтовых вод в котловинах мелких озер. Таким образом, можно предположить, что аномально высокое содержание марганца в воде исследованных озер – это следствие эвтрофирования и заморных явлений. Также обогащение сапропеля марганцем может быть связано с растениями-сапропелеобразователями, которые, отмирая, образуют органогенный осадок, обогащая его элементом, накопленным при жизни [Мальцев и др., 2014].

Выводы

Вода в исследованных водоемах на территории Полтавского МР Омской области по соотношению основных катионов и анионов относится к трем классам (сульфатному, хлоридному, гидрокарбонатному) и трем группам (натриевая, магниевая, кальциевая). Минерализация находится в пределах 278,8–1070,0 мг/л. По сумме солей вода водоемов является пресной. Преобладающий тип жесткости – карбонатная; вода в водоемах относится к жесткой и умеренно жесткой (3,4–7,4 мг-экв/л).

Физико-химические показатели воды в исследованных водоемах Полтавского МР Омской области свидетельствуют о серьезном экологическом неблагополучии ряда водных объектов. По показателю перманганатной окисляемости по Кубелю вода во всех озерах является загрязненной (10,3–22,6 мг О/л) вследствие как антропогенного воздействия (например, сток с полей, выпас и водопой скота), так и естественных процессов (сток с заболоченной водосборной территории, процессы сапропелеобразования). Присутствие значительных количеств ионов аммония в воде озер Караката, Колесникова Балка, Мокрое, Ситное, Камышовое свидетельствует как об аллохтонном поступлении соединений азота извне (попадание органических загрязнителей (фекальные стоки, органические удобрения и др.)), так и об автохтонном образовании ионов аммония непосредственно в самом водоеме в процессе сапропелеобразования, что характерно для водоемов юга Западной Сибири. Необходимо уделить особое внимание водоемам, в которых зафиксировано повышенное содержание ионов аммония на фоне стабильных показателей NO_3^- и NO_2^- . Данная ситуация требует принятия превентивных мер во избежание негативных последствий для экосистемы.

Наиболее неблагоприятная экологическая обстановка складывается по содержанию в водах исследованных озер марганца. Валовое содержание марганца в воде оз. Мокрое – более 10,0 мг/л, что в 100 раз превышает $\text{ПДК}_{\text{ХПВ}}$ и $\text{ПДК}_{\text{КБВ}}$ и в 1000 раз $\text{ПДК}_{\text{РБХЗ}}$. Также существенное превышение ПДК по марганцу установлено в водах озер Колесникова Балка, Ситное, Камышовое. Аномально высокое содержание марганца в воде исследованных озер, вероятнее всего, обусловлено несколькими процессами: 1) эвтрофирование и заморные явления, включая процессы сапропелеобразования; 2) радиальная миграция марганца в системе «донные отложения – поровый раствор – вода – донные отложения» в результате сезонных изменений окислительно-восстановительных условий, pH; 3) поднятие солоноватых грунтовых вод с высокой минерализацией и увеличенной концентрацией железа, марганца, нитратов.

Присутствие в воде озера Колесникова Балка кадмия в количестве 0,0012 мг/л ($1,2 \text{ ПДК}_{\text{ХПВ, КБВ}}$) может быть обусловлено, как и в случае марганца, радиальной миграцией элемента в системе «донные отложения – поровый раствор – вода» в результате сезонных изменений окислительно-восстановительных условий, pH.

Литература

- Агбалян Е. В., Шинкарук Е. В. Гидрохимические показатели качества природных вод малых озер бассейна реки Надым // Успехи современного естествознания. 2015. № 11-2. С. 186–190.
- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 446 с.
- Архипов А. Я., Бугров В. А., Воробьев С. А., Гершман Д. М., Григорян С. В., Киятовский Е. М., Матвеев А. А., Миляев С. А., Николаев В. А., Перельман А. И., Соловов А. П., Шваров Ю. В., Юфа Б. Я., Ярошевский А. А. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / Ред. А. П. Соловов. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Баженова О. П. Оценка экологического состояния озера Ленево (Омская обл.) // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2015. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekologicheskogo-sostoyaniya-ozera-lenevo-omskaya-obl> (дата обращения: 02.05.2025).
- Баженова О. П. Фитопланктон и экологическое состояние озер лесной зоны Омского Прииртышья // Сибирский экологический журнал. 2017. Т. 24, № 3. С. 276–286. doi: 10.15372/SEJ20170305
- Баженова О. П., Герман Л. В., Кренц О. О., Шаховал В. Е., Вахрушев А. А. Экологическое состояние и рекреационная ценность разнотипных озер Омской области // Омский научный вестник. 2012. № 1(108). С. 213–216.
- Балобаненко А. А. Геохимические особенности подземных вод хозяйственно-питьевого назначения

юга Западно-Сибирского артезианского бассейна: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2018. 297 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000 [Электронный ресурс]. Объяснительная записка. Серия Западно-Сибирская, подсерия Омско-Кулундинская. Лист N-42-XVIII (Полтавка) / ООО «Омская геологоразведочная экспедиция». Омск, 2008. 117 с. URL: <https://www.geokniga.org/sites/geokniga/files/mapcomments/n-42-xviii-poltavka-gosudarstvennaya-geologicheskaya-karta-rf-izdanie-vtoro.pdf> (дата обращения: 04.06.2026).

Давыдова О. А., Коровина Е. В., Ваганова Е. С., Гусева И. Т., Красун Б. А., Исаева М. А., Марцева Т. Ю., Мулюкова В. В., Климов Е. С., Бузаева М. В. Физико-химические аспекты миграционных процессов тяжелых металлов в природных водных системах // Вестник ЮУрГУ. Сер. Химия. 2016. Т. 8, № 2. С. 40–50. doi: 10.14529/chem160205

Есипова С. А., Смагулов Б. К., Кулагина Е. В., Мезенцева О. В., Карасев И. Е. География Омской области [Эл. изд.]. Омск: ОмГТУ, 2017. 103 с. URL: <https://rucont.ru/efd/664464> (дата обращения: 10.06.2026).

Зылева Л. И., Коркунов К. В., Козырев В. Е. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Западно-Сибирская. Лист N-43 – Омск. Объяснительная записка / Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ», ООО «ГЕОТЭКС». СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2020. 172 с.

Коровина Е. В., Марцева Т. Ю., Мулюкова В. В., Исаева М. А., Гусева И. Т. Физико-химические аспекты миграции тяжелых металлов и нефтепродуктов в системе вода – донные отложения // Тенденции развития науки и образования. 2016. № 15–4. С. 8–10. doi: 10.18411/ij2016-6-4-03

Королев А. Н., Лейнвебер К. Ю. Сезонная динамика гидрохимических показателей озера Тенис Омской области // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: Мат-лы III Междунар. школы-семинара молодых исследователей / Под ред. В. А. Боева, А. И. Сысо, В. Ю. Хорошавина (Тюмень, 23–28 апреля 2018 г.). Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2018. С. 172–175.

Королев А. Н., Тымань М. А. Влияния солевого состава озер Камышловского лога на химический состав прилегающих почв Марьяновского района Омской области // Всемирный день охраны окружающей среды (Экологические чтения-2017): Мат-лы междунар. науч.-практ. конференции (Омск, 3–5 июня 2017 г.). Омск: ЛИТЕРА, 2017. С. 161–165.

Королев А. Н., Тымань М. А. Озерно-почвенный комплекс Камышловского лога как элементарная ландшафтно-геохимическая система // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: Мат-лы XII Междунар. ландшафтной конференции (Тюмень-Тобольск, 22–25 августа 2017 г.), в 3 т. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2017. С. 290–294.

Кренц О. О., Баженова О. П. Фитопланктон и современное экологическое состояние озера Ик (Омская область) // Тобольск научный – 2017: Мат-лы XVI Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ.

конференции (Тобольск, 16–17 ноября 2017 г.). Тобольск: Аксиома, 2017. С. 108–111.

Лизунов В. В. Географическое положение и природные ресурсы Омской области // Бюллетень ЭКО-КУЛЬТ. Сетевое издание по вопросам экологической культуры. 2013. URL: https://omskmark.moy.su/publ/bulletin_ecocult/ecopolicy_state/2013_lizunov_v_v_natural_resources_omsk_oblast_review_1/58-1-0-702 (дата обращения: 02.06.2026).

Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 21–28.

Макаренко Е. П. Рекреационно-экологическая оценка водных объектов (на примере Томского района) // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 375. С. 179–182.

Мальцев А. Е. Геохимия голоценовых разрезов сапропелей малых озер юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2017. 23 с.

Мальцев А. Е., Леонова Г. А., Бобров В. А., Кривоногов С. К. Геохимические особенности голоценового разреза сапропеля озера Минзелинское (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325, № 1. С. 83–93.

Мальцев А. Е., Леонова Г. А., Бобров В. А., Кривоногов С. К. Геохимия сапропелей голоценовых разрезов из малых озер юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья / Институт геологии и минералогии СО РАН; науч. ред. В. А. Бычинский, Л. М. Кондратьева. Новосибирск: ГЕО, 2019. 443 с.

Мартынова М. В. Формы нахождения марганца, их содержание и трансформация в пресноводных отложениях (аналитический обзор) // Экологическая химия. 2012. Т. 21(1). С. 38–52.

Матевосян А. К. Дополнительные информативные параметры к формуле Курлова // Гидрогеохимия. НАН Армении. 2021. Т. 121, № 3. С. 208–218.

Невенчанная Н. М. Влияние солевого состава озер на почвенный покров территории Камышловского лога Омской области // Молодой ученый. 2014. № 7. С. 258–262.

Общее состояние минерально-сырьевых ресурсов (полезных ископаемых) Омской области на 01 января 2011 года [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20111126210930/http://omsktfti.ru/mineralno-sirevieresursi.html> (дата обращения: 04.03.2025).

Омская область / Сост. А. Юдин; вед. ред. К. Ско-робогатко. М.: Авангард, 2005. 176 с.

Перечень озер, расположенных на территории Омской области // Федеральное агентство по недропользованию. Омский филиал ФБУ «ТФГИ по Сибирскому федеральному округу» [Электронный ресурс]. URL: https://omsktfti.ru/?option=com_content&view=article&id=58:voda4&catid=102&Itemid=351 (дата обращения: 04.03.2025).

Плаксин Г. В., Чернышев А. К., Зайнчковский В. И., Левицкий В. А., Кривонос О. И., Скачков Д. В. Использование сапропелей и продуктов их переработки в различных отраслях экономики // Болота и биосфера: Мат-лы VIII Всерос. с междунар. участием

науч. школы (10–15 сентября 2012 г.). Томск, 2012. С. 104–108.

Приказ Росрыболовства Минсельхоза Российской Федерации от 26.05.2025 г. N 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1312976080> (дата обращения: 04.06.2026).

Проблемы экологии Омской области [Электронный ресурс]. URL: <http://ecology-of.ru/ekologiya-regionov/problemy-ekologii-omskoj-oblasti/> (дата обращения: 15.05.2025).

Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь / Под ред. Г. Д. Эйрих. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 432 с.

Руфова А. А., Татаринова А. В. Антропогенное влияние на гидрохимическое и гидробиологическое состояние поверхностных вод северных городов (на примере г. Якутска) // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 4. С. 535. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20468> (дата обращения: 04.03.2025).

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Постановление Главного государственного санитарного врача России от 28.01.2021. URL: <https://www.law.ru/npd/doc/docid/486051/modid/97> (дата обращения: 07.04.2025).

Храмцов И. Ф., Бойко В. С., Юшкевич Л. В., Воронкова Н. А., Тимохин А. Ю., Балабанова Н. Ф., Чибис В. В., Ледовский Е. Н., Доронин В. Г., Мансапова А. И., Поползухин П. В., Николаев П. Н., Белан И. А., Василевский В. Д., Чекусов М. С., Кем А. А., Бушухина Л. Л. Система адаптивного земледелия Омской области / ФГБНУ «Омский АНЦ». Омск: ИП Макшеевой Е. А., 2020. 522 с.

Фоменко А. И. Региональная специфика озерных вод // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-1. С. 90–94.

Экологический паспорт Омской области / Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20200822060309/http://oldmpr.omskportal.ru/ru/RegionalPublicAuthorities/executivelist/MPR/pravaya-kolonka/ecopasport.html> (дата обращения: 29.05.2026).

References

Agbalyan E. V., Shinkaruk E. V. Hydrochemical indicators of water quality in small lakes of the Nadym River basin. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2015;11-2: 186–190. (In Russ.)

Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1970. 446 p. (In Russ.)

Arkhipov A. Ya., Bugrov V. A., Vorob'ev S. A., Gershtman D. M., Grigoryan S. V., Kiyatovskii E. M., Mat-

veev A. A., Milyaev S. A., Nikolaev V. A., Perel'man A. I., Solovov A. P., Shvarov Yu. V., Yufa B. Ya., Yaroshevskii A. A. Handbook of geochemical prospecting for minerals. Moscow: Nedra; 1990. 335 p. (In Russ.)

Balobanenko A. A. Geochemical features of groundwater for economic and drinking purposes in the south of the West Siberian Artesian basin: PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. Tomsk; 2018. 297 p. (In Russ.)

Bazhenova O. P. Assessment of the ecological state of Lake Lenovo (Omsk Region). *Ehlektroni nauchno-metodicheskii zhurnal Omskogo GAU = Electronic Scientific and Methodological Journal of Omsk SAU*. 2015;2. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekologicheskogo-sostoyaniya-ozera-lenevo-omskaya-obl> (accessed: 02.05.2025).

Bazhenova O. P. Phytoplankton and ecological status of forest lakes in the Omsk Priirtyshye. *Contemporary Problems of Ecology*. 2017;10(3):240–249. doi: 10.1134/S1995425517030027

Bazhenova O. P., German L. V., Krents O. O., Shakhovai V. E., Vakhrushev A. A. Ecological state and recreational value of polytypic lakes in the Omsk Region. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2012;1(108):213–216. (In Russ.)

Davydova O. A., Korovina E. V., Vaganova E. S., Guseva I. T., Krasun B. A., Isaeva M. A., Martseva T. Yu., Mulyukova V. V., Klimov E. S., Buzaeva M. V. Physical-chemistry aspects of migratory processes of heavy metals in natural aqueous systems. *Vestnik YuUrGU. Ser. Khimiya = Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. 2016;8(2):40–50. (In Russ.). doi: 10.14529/chem160205

Eirikh G. D. (ed.). Surface water resources of the USSR: Hydrological study. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 3. Nizhnii Irtysh and Nizhnaya Ob. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1964. 432 p. (In Russ.)

Environmental passport of the Omsk Region. *Ministerstvo prirodnikh resursov i ehkologii Omskoi oblasti = Ministry of Natural Resources and Ecology of the Omsk Region*. (In Russ.). URL: <https://web.archive.org/web/20200822060309/http://oldmpr.omskportal.ru/ru/RegionalPublicAuthorities/executivelist/MPR/pravaya-kolonka/ecopasport.html> (accessed: 29.05.2026).

Environmental problems of the Omsk Region. (In Russ.). URL: <http://ecology-of.ru/ekologiya-regionov/problemy-ekologii-omskoj-oblasti/> (accessed: 15.05.2025).

Esipova S. A., Smagulov B. K., Kulagina E. V., Mezentseva O. V., Karasev I. E. Geography of the Omsk Region [Electronic edition]. Omsk: OmSTU; 2017. 103 p. (In Russ.). URL: <https://rucont.ru/efd/664464> (accessed: 10.06.2026).

Fomenko A. I. Regional features of lake waters. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Studies*. 2013;10-1:90–94. (In Russ.)

Khramtsov I. F., Boiko V. S., Yushkevich L. V., Voronkova N. A., Timokhin A. Yu., Balabanova N. F., Chibis V. V., Ledovskii E. N., Doronin V. G., Mansapova A. I., Popolzhukhin P. V., Nikolaev P. N., Belan I. A., Vasilevskii V. D., Chekusov M. S., Kем A. A., Bushukhina L. L. The system of adaptive agriculture in the

Omsk Region. Omsk: IP Maksheeva E. A.; 2020. 522 p. (In Russ.)

Korolev A. N., Leinveber K. Yu. Seasonal dynamics of hydrochemical parameters of Lake Tenis in the Omsk Region. *Biogeokhimiya khimicheskikh ehlementov i soedinenii v prirodnykh sredakh: Mat-ly III Mezhdunar. shkoly-seminara molodykh issledovatelei* (Tyumen', 23–28 aprelya 2018 g.) = *Biogeochemistry of chemical elements and compounds in natural environments: Proceed. of the III Int. school-seminar for young researchers* (Tyumen, April 23–28, 2018). Tyumen': TyumGU; 2018. P. 172–175. (In Russ.)

Korolev A. N., Tyman' M. A. Impact of the salt composition of lakes of the Kamyshlovsky Log on the chemical composition of the adjacent soils of the Maryanovsk District of the Omsk Region. *Vsemirnyi den' okhrany okruzhayushchei sredy (Ehkologicheskoe chteniya-2017): Mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii* (Omsk, 3–5 iyunya 2017 g.) = *World Environment Day (Environmental readings – 2017): Proceed. of the int. scientific and practical conf.* (Omsk, June 3–5, 2017). Omsk: LITERA; 2017. P. 161–165. (In Russ.)

Korolev A. N., Tyman' M. A. Lake-soil complex of the Kamyshlovsky Log as an elementary landscape-geochemical system. *Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ehkologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustoychivogo razvitiya-2017: Mat-ly XII Mezhdunar. landshaftnoi konferentsii* (Tyumen'-Tobol'sk, 22–25 avgusta 2017 g.) = *Landscape science: theory, methods, and landscape-ecological support for nature management and sustainable development: Proceed. of the XII int. landscape conf.* (Tyumen–Tobolsk, August 22–25, 2017). Tyumen': TyumGU; 2017. P. 290–294. (In Russ.)

Korovina E. V., Martseva T. Yu., Mulyukova V. V., Isaeva M. A., Guseva I. T. Physical and chemical aspects of migration of heavy metals and oil products in the water – bottom sediment system. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the Development of Science and Education*. 2016;15(4):8–10. (In Russ.). doi: 10.18411/lj2016-6-4-03

Krents O. O., Bazhenova O. P. Phytoplankton and the current ecological state of Lake Ik (Omsk Region). *Tobol'sk nauchnyi – 2017: Mat-ly XVI Vseros. (s mezhdunar. uchastiem) nauch.-prakt. konferentsii* (Tobol'sk, 16–17 noyabrya 2017 g.) = *Scientific Tobolsk – 2017: Proceed. of the XVI All-Russ. scientific and practical conf. (with int. part.)* (Tobolsk, Nov. 16–17, 2017). Tobol'sk: Aksioma; 2017. P. 108–111. (In Russ.)

List of lakes located in the Omsk Region. *Federal'noe agentstvo po nedropol'zovaniyu. Omskii filial FBU «TFGI po Sibirskomu federal'nomu okrugu» = Federal Agency for Subsoil Use. Omsk Branch of the FBI Territorial Fund of Geological Information for the Siberian Federal District*. (In Russ.). URL: https://omsktfti.ru/?option=com_content&view=article&id=58:voda4&catid=102&Itemid=351 (accessed: 04.03.2025).

Lizunov V. V. Geographical location and natural resources of the Omsk Region. *Byulleten' EhKOKUL'T. Setevoe izdanie po voprosam ehkologicheskoi kul'tury = Bulletin of Ecocult. Online journal on environmental culture*. 2013. (In Russ.). URL: https://omskmark.moy.su/publ/bulletin_ecocult/ecopolicy_state/2013_

[lizunov_v_v_natural_resources_omsk_oblast_review_1/58-1-0-702](#) (accessed: 02.06.2026).

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. Processes of transformation, circulation and formation of substances in natural waters. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2011;4:21–28. (In Russ.)

Makarenko E. P. Recreational and ecological assessment of water bodies (using the example of the Tomsk Region). *Vestnik Tomskogo gos. universiteta = Tomsk State University Journal*. 2013;375:179–182. (In Russ.)

Mal'tsev A. E. Geochemistry of Holocene sections of sapropels of small lakes in the South of Western Siberia and Eastern Baikal region: DSc (Cand. of Geol.-Min.) thesis. Novosibirsk; 2017. 23 p. (In Russ.)

Mal'tsev A. E., Leonova G. A., Bobrov V. A., Krivonogov S. K. Geochemical features of the Holocene sapropel section of Lake Minzelinskoye (Western Siberia). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 2014;325(1):83–93. (In Russ.)

Mal'tsev A. E., Leonova G. A., Bobrov V. A., Krivonogov S. K. Geochemistry of the Holocene sapropels from small lakes of the southern Western Siberia and eastern Baikal regions. Novosibirsk: GEO; 2019. 443 p. (In Russ.)

Martynova M. V. Manganese forms, their contents, and transformation in freshwater sediments (an analytical review). *Ekologicheskaya khimiya = Environmental Chemistry*. 2012;21(1):38–52. (In Russ.)

Matevosyan A. K. Additional informative parameters to Kurlov's formula. *Gidrogeokhimiya. NAN Armenii = Hydrogeochemistry. NAS of Armenia*. 2021;121(3):208–218. (In Russ.)

Nevenchannaya N. M. The influence of the salt composition of lakes on the soil cover of the Kamyshlovsky Log in the Omsk Region. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2014;7:258–262. (In Russ.)

Order No. 296 of the Federal Agency for Fishery (Rosrybolovstvo) of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated May 26, 2025 'On approval of water quality standards for water bodies of fisheries significance, including standards for maximum permissible concentrations of pollutants in the waters of water bodies of fisheries significance'. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1312976080> (accessed: 04.06.2026).

Overall state of mineral resources (mineral deposits) in the Omsk Region as of January 1, 2011. (In Russ.). URL: <https://web.archive.org/web/20111126210930/http://omsktfti.ru/mineralno-sirevieresursi.html> (accessed: 04.03.2025).

Plaksin G. V., Chernyshev A. K., Zainchkovskii V. I., Levitskii V. A., Krivonos O. I., Skachkov D. V. The use of sapropels and their processed products in various sectors of the economy. *Bolota i biosfera: Mat-ly VIII Vseros. s mezhdunar. uchastiem nauch. shkoly* (10–15 sentyabrya 2012 g.) = *Swamps and the biosphere: Proceed. of the VIII All-Russ. scientific school with int. part. (Sept. 10–15, 2012)*. Tomsk; 2012. P. 104–108. (In Russ.)

Rufova A. A., Tatarinova A. V. Anthropogenic impact on the hydrochemical and hydrobiological state of surface waters of northern cities (on the example

of Yakutsk). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = *Modern Problems of Science and Education*. 2015;4:535. (In Russ.). URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20468> (accessed: 04.03.2025).

SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and/or harmlessness of environmental factors for humans. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of Russia dated January 28, 2021. (In Russ.). URL: <https://www.law.ru/npd/doc/docid/486051/modid/97> (accessed: 07.04.2025).

State Geological Map of the Russian Federation, scale of 1:200,000 [website]. An explanatory note.

The West Siberian series, the Omsko-Kulundinskaya sub-series. Sheet N-42-XVIII (Poltavka). Omsk; 2008. 117 p. (In Russ.). URL: <https://www.geokniga.org/sites/geokniga/files/mapcomments/n-42-xviii-poltavka-gosudarstvennaya-geologicheskaya-karta-rf-izdanie-vtoro.pdf> (accessed: 04.06.2026).

Yudin A. (comp.), Skorobogat'ko K. (ed.). Omsk Region. Moscow: Avangard; 2005. 176 p. (In Russ.)

Zyleva L. I., Korkunov K. V., Kozyrev V. E. et al. The State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1:1,000,000. The 3rd generation. The West Siberian series. Sheet N-43 – Omsk. An explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI; 2020. 172 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 27.04.2026; принята к публикации / accepted: 07.08.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Королёв Александр Николаевич

канд. биол. наук, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»

e-mail: korolev66.66@mail.ru

Ловинецкая Светлана Борисовна

канд. биол. наук, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»

e-mail: s.lovinetskaya@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Korolev, Alexander

Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor

Lovinetskaya, Svetlana

Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor

УДК 550.424

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Е. Ю. Яковлев^{1*}, А. В. Пучков¹, А. Е. Липкина²

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (пр-т Никольский, 20, Архангельск, Россия, 163020), *yakov24lev99@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра геоэкологии (Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034)

Статья посвящена комплексной оценке радиоэкологического состояния донных отложений северо-восточной части Баренцева моря. В основе работы лежат данные, полученные в ходе морской экспедиции «Арктический плавучий университет» в июле 2024 года. Определена удельная активность техногенного ^{137}Cs и природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в поверхностном слое (0–3 см) донных осадков, отобранных на 39 океанографических станциях. Средняя активность составила: 1,9 Бк/кг для ^{137}Cs , 20,5 Бк/кг для ^{226}Ra , 28,4 Бк/кг для ^{232}Th и 655,9 Бк/кг для ^{40}K . Активность природных радионуклидов находится в характерных для региона диапазонах. Уровни техногенного радиационного загрязнения по ^{137}Cs ниже средних для акватории Баренцева моря. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии современных поступлений и общей тенденции к снижению техногенного радиоактивного загрязнения. Корреляционный анализ выявил сильную взаимосвязь между ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , а также их зависимость от гранулометрического состава и содержания органического вещества. В отличие от естественных радионуклидов накопление ^{137}Cs контролируется в первую очередь локальными литолого-геохимическими условиями, а не глубиной бассейна. Расчет индексов радиологической безопасности показал, что текущие уровни естественной радиоактивности не представляют угрозы для морских экосистем. Полученные данные создают актуальную фоновую основу для мониторинга арктического шельфа в условиях его планируемого промышленного освоения и климатических изменений.

Ключевые слова: Арктика; арктический шельф; Баренцево море; радионуклиды; донные отложения; динамика загрязнения; радиологическая безопасность

Для цитирования: Яковлев Е. Ю., Пучков А. В., Липкина А. Е. Оценка современного радиоэкологического состояния донных отложений северо-восточной части Баренцева моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 72–86. doi: 10.17076/lim2388

Финансирование. Исследование выполнено в рамках ФНИР FUUW-2025-0011 «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений» (№ госрегистрации 125022002727-2). Экспедиционные исследования выполнены в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-03-2025-662/8).

E. Yu. Yakovlev^{1*}, A. V. Puchkov¹, A. E. Lipkina². ASSESSMENT OF THE CURRENT RADIOECOLOGICAL STATE OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE NORTHEASTERN PART OF THE BARENTS SEA

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (20 Nikolsky Ave., 163020 Arkhangelsk, Russia), *yakov24lev99@mail.ru

² St. Petersburg State University, Department of Geoecology (7-9 Universitetskaya Emb., 199034 St. Petersburg, Russia)

This article presents a comprehensive assessment of the radioecological state of bottom sediments in the northeastern part of the Barents Sea. The study is based on data obtained during the marine expedition "Arctic Floating University" in July 2024. Specific activities of anthropogenic ¹³⁷Cs and natural ²²⁶Ra, ²³²Th, and ⁴⁰K radionuclides were determined in the top 3-cm layer of sediments collected at 39 oceanographic stations. The average activities were 1.9 Bq/kg for ¹³⁷Cs, 20.5 Bq/kg for ²²⁶Ra, 28.4 Bq/kg for ²³²Th, and 655.9 Bq/kg for ⁴⁰K. The levels of anthropogenic radioactive contamination, proxied by ¹³⁷Cs activity, are characterized as extremely low, below the average values for the Barents Sea. The data indicate the absence of recent inputs and a general declining trend in anthropogenic radioactive contamination. The activities of natural radionuclides fall within the ranges characteristic of the region. Correlation analysis revealed strong alignment between ²²⁶Ra, ²³²Th, and ⁴⁰K, as well as their dependence on grain size composition and organic matter content. In contrast to natural radionuclides, the accumulation of ¹³⁷Cs is primarily controlled by local lithological and geochemical conditions rather than by water depth. Calculations of radiological safety indices showed that the current levels of natural radioactivity pose no threat to marine ecosystems. The results provide a relevant background framework for monitoring the Arctic shelf in the context of its planned industrial development and ongoing climate change.

Keywords: Arctic; Arctic shelf; Barents Sea; radionuclides; sediments; pollution dynamics; radiological safety

For citation: Yakovlev E. Yu., Puchkov A. V., Lipkina A. E. Assessment of the current radioecological state of bottom sediments in the northeastern part of the Barents Sea. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 72–86. doi: 10.17076/lim2388

Funding. The study was carried out within the framework of the state research assignment no. FUUW-2025-0011 "Peculiarities of the migration of elements and their isotopes in the environmental components of the Western sector of the Russian Arctic under conditions of climatic and anthropogenic changes", state registration number 125022002727-2. Fieldwork was carried out within Floating University All-Russian Scientific and Educational Program (contract # 075-03-2025-662/8).

Введение

Арктическая морская среда с середины XX века подвергалась значительному антропогенному радиоактивному загрязнению [Дибнер и др., 1970; Gwynn et al., 2004; Lokas et al., 2013; Miroshnikov et al., 2017]. Основным источником техногенной радиоактивности в Российской Арктике является полигон Новая Земля, где в период с 1954 по 1990 год проводились многочисленные атмосферные, подводные и подземные ядерные взрывы [Сыч, Дубинко, 2012]. Кроме того, регион испытал воздействие от выбросов радиохимических заводов Западной Европы, ядерных объектов в Сибири и глобальных радиоактивных выпадений и аварии

на Чернобыльской АЭС [Саркисов и др., 2015]. Эти источники обусловили попадание значительных количеств искусственных радионуклидов в арктические экосистемы [IAEA..., 1999; UNSCEAR..., 2000; Matishov et al., 2004; Saniewski, 2017; Zaborska, 2017].

В последние десятилетия наблюдается общее снижение активности искусственных радионуклидов в арктической морской среде [Ilin et al., 2017; Yakovlev, Puchkov, 2020]. Это снижение объясняется прекращением крупных атмосферных испытаний, уменьшением выбросов и естественными процессами, такими как радиоактивный распад, разбавление и эффективное связывание радионуклидов донными отложениями. Однако необходимость постоянного

радиоэкологического мониторинга в Арктике остается критически важной. Это обусловлено наличием в регионе многочисленных потенциальных источников радиоактивного загрязнения: затопленных ядерных и радиационно-опасных объектов, наследия ядерных испытаний на Новой Земле, а также активизацией хозяйственной деятельности, связанной с добычей углеводородов и развитием судоходства по Северному морскому пути [Башмакова, Ульянов, 2019; Пилисов, Котов, 2024].

Среди арктических морей Баренцево море выделяется как зона особого интереса в отношении техногенного радиоактивного загрязнения [Сивинцев и др., 2005; Величкин и др., 2013; Саркисов и др., 2015]. В нем сосредоточено наибольшее количество объектов, представляющих радиационную опасность, что обусловлено наличием промышленной, военной и портовой инфраструктуры, связанной с эксплуатацией ядерных установок, атомным судостроением и судоремонтом, транспортировкой и хранением ядерных материалов [Сивинцев и др., 2005; Кобылянский и др., 2012; Матишов и др., 2019]. Многообразие потенциальных источников радиоактивности делает Баренцево море ключевым районом для оценки последствий и текущего состояния радиационного загрязнения.

Помимо мониторинга техногенных радионуклидов первостепенное значение для Баренцева моря имеет изучение природных радионуклидов, таких как ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Это связано с наличием обширных нефтегазовых месторождений на его шельфе, планируемых к разработке в ближайшие годы [Назаров и др., 2021]. Известно, что углеводороды и связанные с ними пластовые воды содержат повышенные уровни природных радионуклидов. Отсюда предполагается, что будущая добыча может стать потенциальным источником повышенной природной радиоактивности в морской среде и это увеличит радиоэкологические риски [Dowdall, Lepland, 2012; AMAP., 2016; Skancke, Nordam, 2016].

Новой и актуальной проблемой является риск вторичного загрязнения, вызванный глобальным изменением климата [Kwiatkowski et al., 2020; Gwynn et al., 2024]. Ускоренное таяние арктического ледового щита, особенно на Новой Земле, угрожает ремобилизацией техногенных радионуклидов, отложившихся во время атмосферных испытаний в 1950-х и 1960-х годах, и их высвобождением в морскую среду [Matishov et al., 2011; Мирошников, 2018].

Исходя из этого, целью данного исследования была оценка текущих уровней активности основных природных (^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K) и техногенных

(^{137}Cs) радионуклидов в донных отложениях Баренцева моря. Донные отложения являются основным долгосрочным хранилищем и архивом радионуклидов, накапливая значительную часть радиоактивности, попадающей в водную среду [Трапезников, 2007]. Радиоактивность донных осадков Баренцева моря рассматривалась в работах [Matishov, Matishov, 2004; Matishov et al., 2011, 2014]. Затем оценка радиационного состояния донных осадков Баренцева моря в целом была выполнена авторами в 2019 году [Yakovlev, Puchkov, 2020]. Однако в рамках проведенной работы оказалась недостаточно изучена северо-восточная часть Баренцева моря в связи со сложной ледовой обстановкой в период исследований в мае–июне 2019 года, что не позволило детально выполнить опробование донных осадков. Позднее, в июле 2024 года, когда площадь льда в этом районе сократилась, было проведено более детальное исследование. Местоположение некоторых станций отбора в 2019 и 2024 году совпадает, что позволяет сделать сопоставление динамики активности радионуклидов в донных осадках и выявить тенденции изменения радиоэкологического состояния этой части Баренцева моря. Таким образом, задачами данной работы являются анализ пространственного распределения радиоактивных элементов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря, установление современных базовых уровней активности, оценка текущей радиоэкологической ситуации, оценка динамики изменений в период с 2019 по 2024 г., связанных как с природными процессами, так и с антропогенной деятельностью в регионе.

Материалы и методы

Район исследования расположен в северо-восточной части шельфа Баренцева моря между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. Шельф данного района обладает резко расчлененным рельефом дна с глубинами от 50–100 до 400–450 м [Никитин и др., 2020]. Изучаемая акватория имеет полярный морской климат, который характеризуется продолжительной зимой, коротким летом, малыми годовыми колебаниями температуры воздуха, значительной относительной влажностью, облачностью и большим количеством осадков (350 мм/год). Гидрологический режим района обусловлен климатическими особенностями, характером водообмена с прилегающими акваториями и рельефом дна. Температура воды на поверхности моря уменьшается

с запада на восток, соленость воды с глубиной возрастает и колеблется от 32 до 35 ‰ [Никитин и др., 2020].

Схема расположения точек опробования донных осадков и обзорная карта района исследований представлены на рис. 1. Отбор проб донных отложений проходил в июле 2024 года в рамках экспедиции «Арктический плавучий университет» на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов». Всего было выполнено опробование донных отложений на 39 станциях океанографических разрезов. Отбор проб проводился с помощью дночерпателя Ван-Вина. Для аналитических исследований отбирался только верхний слой донных отложений мощностью 0–3 см, представляющий современные осадки и отражающий текущие уровни загрязнения морской среды радионуклидами. В лабораторных условиях определяли содержание ^{137}Cs , являющегося основным дозобразующим радионуклидом техногенного происхождения, а также содержание ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , которые вносят основной вклад в формирование естественного радиационного фона.

Также выполнено определение гранулометрического состава и основных физико-химических параметров, определяющих накопление радиоактивных элементов донными осадками.

Определение радионуклидов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K проводилось с применением низкофоновых полупроводниковых гамма-спектрометров ORTEC (США) на основе коаксиальных детекторов GEM10, GMX25, GEM40 из особо чистого германия (HPGe) с цифровым анализатором и программным обеспечением (MAESTRO-32 и GAMMA-VISION-32, SpectraLine GP). Относительная эффективность детекторов составляет 15, 25 и 40 соответственно. Калибровка детекторов по энергии проводилась с применением объемных мер активности специального назначения (OMACH) разной плотности (кварцевый песок, ионно-обменная смола типа КУ-2-8, древесные опилки) с набором радионуклидов ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{88}Y , ^{137}Cs , ^{152}Eu . Отдельные экспрессные измерения активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K были проведены с применением гамма-спектрометра сцинтилляционного «Прогресс-гамма». Калибровка по энергии

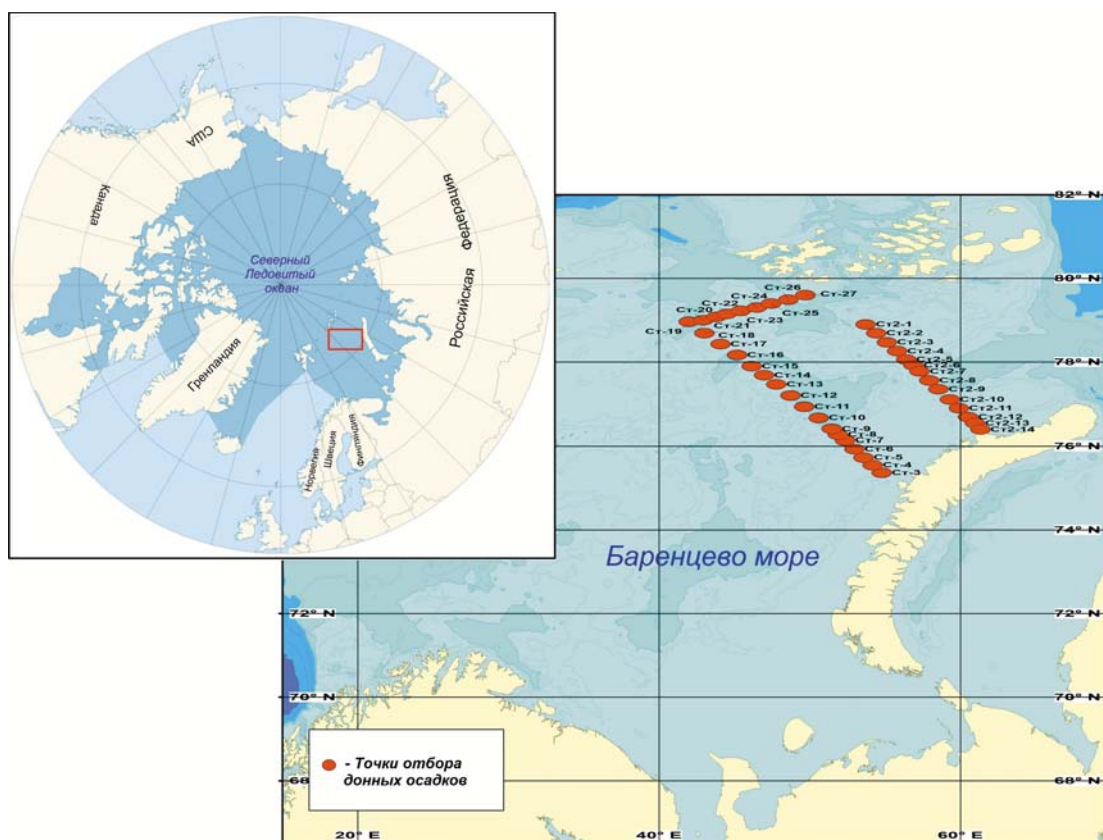


Рис. 1. Местоположение района исследований и схема опробования донных осадков в северо-восточной части Баренцева моря

Fig. 1. Location of the study area and bottom sediment sampling scheme in the northeastern part of the Barents Sea

сцинтилляционного спектрометра проводилась с применением контрольного источника «Cs-K» в геометрии «Маринелли» 1 литр. Результаты приведены на сухую массу донных отложений.

Гранулометрический состав донных отложений определяли на виброситовом анализаторе RETSCH AS 200 control (Германия). Интерпретацию гранулометрического состава донных отложений выполняли согласно шкале Вентворта [Valentine, 2019]. Физико-химические показатели, такие как массовая доля органического вещества, карбонатов (CO_3^{2-}) и золы, выполняли по общепринятым методикам [Yakovlev, Puchkov, 2020].

Статистическая обработка данных и корреляционный анализ выполнялись с использованием программного пакета OriginPro (версия 2021, OriginLab Corporation, США). Для анализа корреляционных связей использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена, поскольку распределение большинства исследуемых параметров не соответствовало нормальному закону (проверка нормальности выполнялась по критерию Колмогорова – Смирнова). Визуализация корреляционных матриц также выполнялась в среде OriginPro. В корреляционную матрицу были включены следующие параметры: удельная активность радионуклидов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K (Бк/кг); глубина моря (м); гранулометрические фракции: >250 мкм, 100–250 мкм, 45–100 мкм, <45 мкм (%); физико-химические параметры: содержание органического вещества (ОВ, %), содержание карбонатов (CO_3^{2-} , %), зольность (%). Оценка тесноты корреляционной связи выполнялась по шкале Чеддока: при $|\rho| < 0,3$ связь считалась слабой; при $0,3 \leq |\rho| < 0,5$ – умеренной; при $0,5 \leq |\rho| < 0,7$ – заметной; при $0,7 \leq |\rho| < 0,9$ – высокой; при $|\rho| \geq 0,9$ – весьма высокой. Уровень статистической значимости был принят при $p < 0,05$.

Первичные материалы результатов исследований приведены в приложениях.

Результаты и обсуждение

Гамма-спектрометрия

В обобщенном виде результаты гамма-спектрометрических измерений ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в верхнем слое донных отложений на 39 станциях северо-восточной части Баренцева моря представлены в табл. 1.

Карты распределения радиоактивных элементов в изученной части акватории Баренцева моря показаны на рис. 2. Так, значения удельной активности радионуклидов убывают в порядке $^{40}\text{K} > ^{232}\text{Th} > ^{226}\text{Ra} > ^{137}\text{Cs}$. Можно отметить, что полученные значения активности естественных радионуклидов ^{226}Ra и ^{232}Th в донных осадках несколько ниже среднемировых, в то время как активность ^{40}K выше [UNSCEAR..., 2000]. Согласно [UNSCEAR..., 2000] среднемировые значения активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в донных осадках составляют 35, 30 и 400 Бк/кг соответственно. Сравнительно высокое содержание ^{40}K в донных осадках этого района Баренцева моря, вероятно, связано с большей обогащенностью коренных пород калийсодержащими минералами, слагающими побережье Новой Земли [Evaluation..., 1999]. Выветривание этих пород, вероятно, является основным источником материала для формирования литогенной части донных осадков. С геохимической точки зрения средние значения содержания естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K соответствуют значениям, характерным для верхней континентальной коры, согласно [Rudnick, Gao, 2014].

Судя по картам распределения ^{226}Ra и ^{232}Th , их повышенные значения активности тяготеют к глубоким участкам изученной акватории – с глубинами более 300 м, что, по всей видимости, связано с накоплением этих радионуклидов в составе мелкодисперсных фракций донных осадков, слагающих впадины шельфа.

Таблица 1. Удельная активность ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в донных отложениях северо-восточной части Баренцева моря

Table 1. Specific activity of ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea

Радионуклид Radionuclide	Удельная активность, Бк/кг Specific activity, Bq/kg		
	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Среднее Average
^{137}Cs	< 0,5	$3,3 \pm 0,6^*$	$1,9 \pm 0,5$
^{226}Ra	$10,3 \pm 1,4$	$30,0 \pm 2,7$	$20,5 \pm 2,3$
^{232}Th	$15,8 \pm 1,7$	$40,0 \pm 4,0$	$28,4 \pm 3,2$
^{40}K	$520,0 \pm 42,0$	$790,0 \pm 71,0$	$655,9 \pm 54,1$

Примечание. *Среднее значение удельной активности $\pm$ стандартное отклонение. Бк/кг (n = 39).

Note. *Mean specific activity $\pm$ standard deviation. Bq/kg (n = 39).

Диапазон вариаций ^{226}Ra (10,3–30,0 Бк/кг) и ^{232}Th (15,8–40,0 Бк/кг) соответствует интервалу значений активности, характерных для акватории Баренцева моря, согласно данным 2019 года [Yakovlev, Puchkov, 2020]. Пространственное распределение ^{226}Ra и ^{232}Th коррелирует между собой, указывая на схожие закономерности накопления в морских донных осадках. Для ^{40}K отмечается достаточно узкий диапазон вариаций активности в изученной части акватории Баренцева моря (520–790 Бк/кг). В то же время для акватории Баренцева моря в целом диапазон вариаций активности ^{40}K составляет от 40 до 700 Бк/кг [Yakovlev, Puchkov, 2020]. Заметно также, что пространственное распределение ^{40}K в изученной части акватории является относительно равномерным, и это указывает на предположительно единый источник калия в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря, обусловленный, по всей видимости, выносом с Новой Земли. Согласно работе [Дибнер,

Крылов, 1970], содержание К в глинистых сланцах Новой Земли составляет в среднем 2,1 %, что соответствует ~ 650 Бк/кг радиоактивного ^{40}K . Таким образом, содержание ^{40}K в донных осадках изученной акватории близко к содержанию ^{40}K в коренных породах Новой Земли.

В то же время необходимо отметить, что планируемая активная добыча углеводородов на баренцевоморском шельфе может привести к поступлению в морскую среду пластовых вод, обогащенных изотопами радия и тория, и к локальному повышению их удельной активности, как наблюдается в настоящее время на норвежском шельфе [Skanske, Nordam, 2016]. Таким образом, полученные данные о фоновых значениях естественных радионуклидов в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря представляют собой отправную точку для будущих радиоэкологических оценок при разработке углеводородных месторождений на арктическом шельфе.

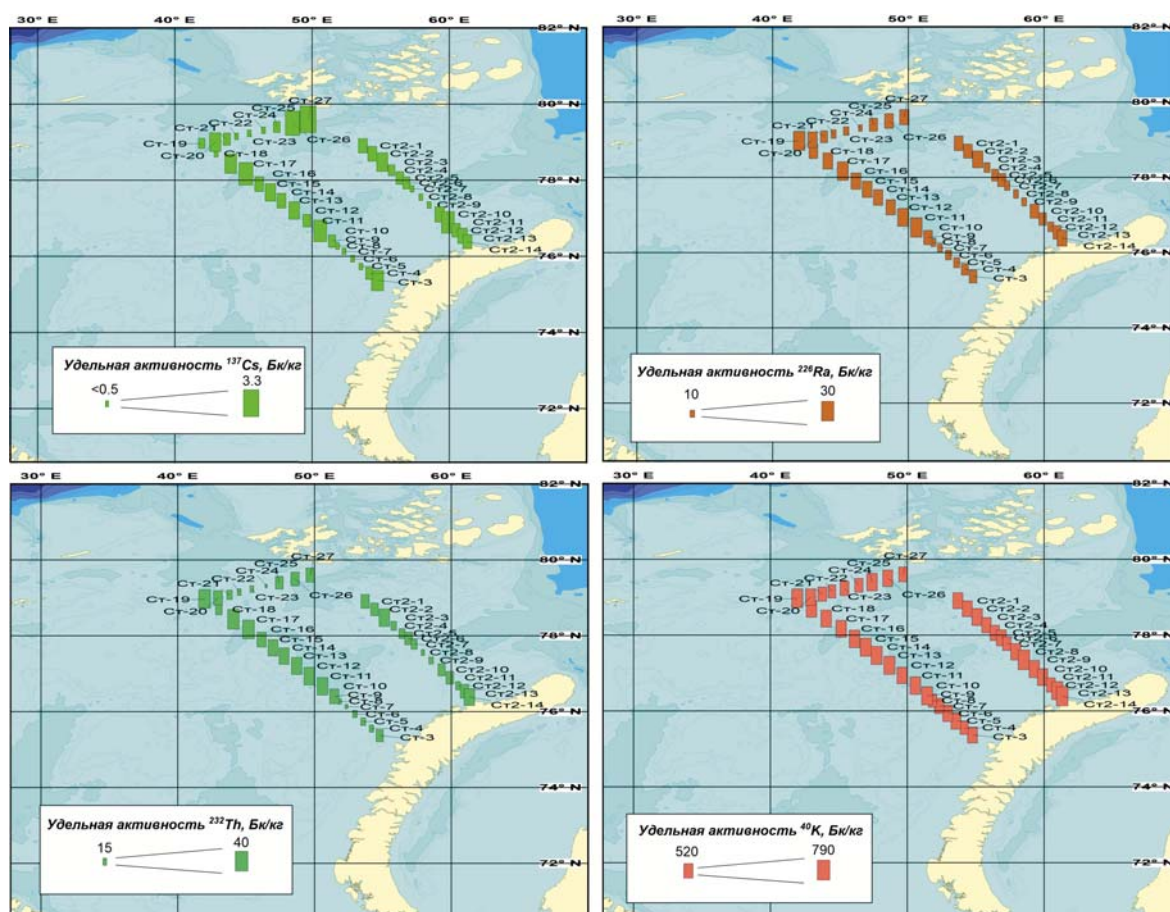


Рис. 2. Распределение удельной активности ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в донных отложениях северо-восточной части Баренцева моря

Fig. 2. Distribution of specific activities of ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea

Наибольший интерес с точки зрения оценки радиоактивности акватории Баренцева моря представляет радионуклид ^{137}Cs , являющийся одним из основных компонентов техногенного радионуклидного загрязнения природной среды в Арктике. Так, удельная активность ^{137}Cs в изученных донных осадках варьирует в пределах $<0,5\text{--}3,3$ Бк/кг, при среднем значении 1,9 Бк/кг, что несколько ниже, чем в баренцево-морской акватории в целом (3,2 Бк/кг) [Yakovlev, Puchkov, 2020]. Низкий уровень техногенного радиационного загрязнения донных осадков северо-восточной части Баренцева моря обусловлен как особенностями гидродинамики (разрыв поверхностного слоя осадка течениями) и низкой скоростью осадконакопления, характерной для открытых участков моря, так и общим резким снижением поступления техногенных изотопов в морскую среду Арктики. Короткоживущие техногенные радионуклиды, такие как ^{134}Cs и ^{60}Co (периоды полураспада ~ 2 и ~ 5 лет соответственно), в донных осадках не обнаружены, что связано с отсутствием современного внешнего поступления техногенной радиоактивности в изученную часть акватории Баренцева моря.

Обращает на себя внимание пространственное распределение ^{137}Cs в изученном районе. На рис. 2 наблюдается тенденция к повышению его удельной активности в донных осадках, тяготеющих к побережью архипелага Новая Земля, и в северной части района, приближенной к архипелагу Земля Франца-Иосифа. Это, вероятно, связано с тем, что донные осадки вблизи Новой Земли накапливали техногенные радионуклиды в период активных атмосферных ядерных испытаний на Новоземельском полигоне. Как показано в работе [Miroshnikov et al., 2017], основная масса радиоактивных выпадений от взрывов была направлена к северо-востоку, в сторону Северного Ледовитого океана, и проходила непосредственно над северной оконечностью Новой Земли и вдоль ее побережья, а также в сторону архипелага Земля Франца-Иосифа. Именно вдоль этих траекторий фиксируются локальные аномалии повышенной удельной активности ^{137}Cs в донных осадках, что полностью согласуется с полученными данными в настоящей работе.

Физико-химические параметры донных осадков

Донные отложения северо-восточной части Баренцева моря характеризуются преобладанием тонкодисперсных фракций. В большинстве проб доля фракции < 45 мкм (глинистая и тонкая алевритовая составляющая) варьирует

в пределах 20–30 %, достигая в отдельных точках 30–40 %. Крупнообломочные фракции (> 250 мкм) присутствуют в незначительных количествах, в основном не превышая 5 %. Содержание органического вещества, определенное по потерям при прокаливании, в среднем составляет 10–12 %, с тенденцией к увеличению в зонах аккумуляции тонкодисперсного материала и в глубоководных впадинах. Карбонатность осадков (CO_3^{2-}) варьирует в пределах 5–15 %, при этом ее повышенные значения приурочены к районам, испытывающим влияние терригенного сноса с близлежащих островов и архипелагов.

Для выявления особенностей накопления радионуклидов в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря выполнен корреляционный анализ полученных данных: активности радионуклидов, глубины моря и гранулометрического состава (рис. 3).

Статистический анализ результатов

Как видно из корреляционной матрицы, естественные радиоактивные ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K коррелируют между собой на уровне сильной положительной связи. Коэффициенты корреляции в парах $^{226}\text{Ra} - ^{232}\text{Th}$, $^{226}\text{Ra} - ^{40}\text{K}$ и $^{232}\text{Th} - ^{40}\text{K}$ составляют $r = 0,96$; $r = 0,59$ и $r = 0,64$ соответственно. Вероятно, это указывает на общие источники поступления естественных радионуклидов в донные осадки и сходные механизмы сорбции. Подтверждением этого служит наличие значимых положительных корреляционных связей между естественными радионуклидами и физико-химическими параметрами – содержанием органического вещества и карбонатов в донных осадках, а также содержанием глинистых фракций < 45 мкм. Эти результаты подтверждают активную сорбцию естественных радионуклидов на поверхности глинистых минералов, что закономерно. И напротив, эффективность сорбции с увеличением размера фракций донных осадков резко падает. Например, для ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K и фракции осадков 100–250 мкм наблюдается отрицательная корреляционная связь, а для более крупных фракций, от 250 мкм, связь с радионуклидами практически отсутствует.

Важную роль в их накоплении донными осадками также играют органическое вещество и карбонаты, за счет как прямой сорбции, так и, возможно, биологического концентрирования (в случае ^{40}K). При этом примечательной является связь ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K с глубиной моря. Так, для ^{226}Ra и ^{232}Th связь с глубиной характеризуется значимой положительной корреляцией $r = 0,56$ и $0,54$ соответственно. Очевидно,

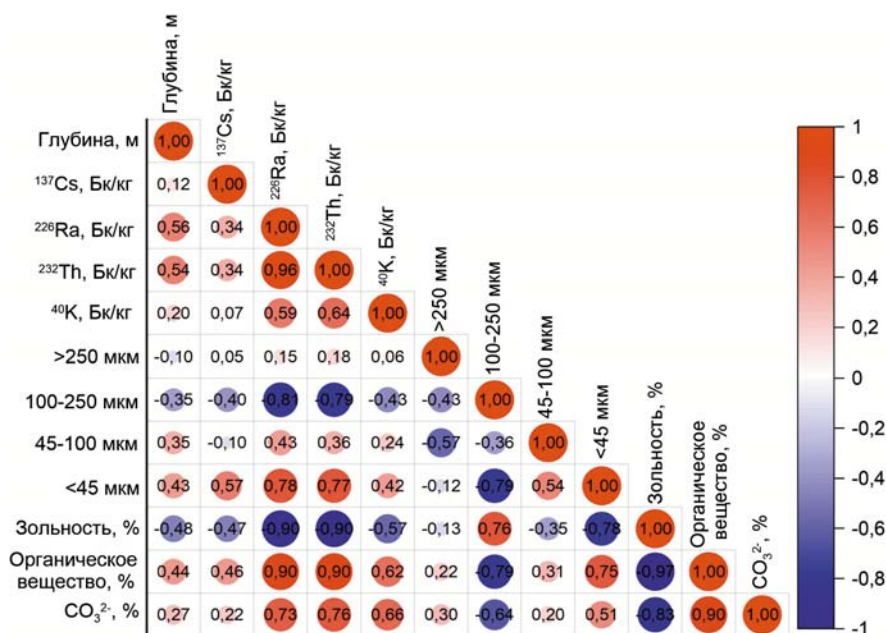


Рис. 3. Корреляционная матрица набора данных по донным осадкам северо-восточной части Баренцева моря. Поскольку распределение выборки является ненормальным (по критерию Колмогорова – Смирнова), данные представлены в виде коэффициента ранговой корреляции Спирмена

Fig. 3. Correlation matrix of the dataset for bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea. Since the sample distribution is not normal (according to the Kolmogorov-Smirnov test), the data are presented as Spearman's rank correlation coefficient

что это обусловлено увеличением фаз-носителей ²²⁶Ra и ²³²Th с увеличением глубины, то есть в основном доли мелкодисперсных фракций и органического вещества. Связь в парах «глубина – фракция < 45 мкм» и «глубина – органическое вещество» характеризуется наличием положительных умеренных корреляций на уровне $r = 0,43$ и $0,44$ соответственно. Однако для ⁴⁰K связи с глубиной моря не наблюдается, что, очевидно, указывает на неравномерное распределение калийсодержащих минералов по фракциям донных осадков [Grigoryev, Vladimirov, 2011]. То есть значимая активность ⁴⁰K может находиться как в глинистых фракциях, например, в составе иллита, так и в более крупнообломочных фракциях в составе, например, полевых шпатов и слюд.

Выявлены корреляционные связи техногенного ¹³⁷Cs с другими рассмотренными параметрами. Так, радиоцезий имеет положительную, близкую к умеренной связь с естественными радионуклидами ²²⁶Ra и ²³²Th ($r = 0,34$), что указывает на общность их геохимического поведения в донных осадках. Это, вероятно, связано с тем, что ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra и ²³²Th являются катионами, склонными к сорбции на глинистых минералах и органическом веществе [Singh, Um, 2023].

Подтверждением связи радиоцезия с этими параметрами является наличие умеренной корреляции в парах «¹³⁷Cs – фракция < 45 мкм» и «¹³⁷Cs – органическое вещество» с коэффициентами корреляции $r = 0,57$ и $0,46$. Связь ¹³⁷Cs с CO₃²⁻ характеризуется как слабая положительная ($r = 0,22$), что указывает на ограниченную сорбционную способность карбонатов по отношению к радиоцезию. Между ¹³⁷Cs и ⁴⁰K также наблюдается слабая положительная связь ($r = 0,20$), что, как говорилось выше, может быть связано с крайне неравномерным распределением ⁴⁰K по фракциям донных осадков. Обращает на себя внимание слабая положительная связь между радиоцезием и глубиной моря ($r = 0,12$). Так, с увеличением глубины, что логично, доля глинистых осадков увеличивается, поскольку глубоководные котловины выступают в качестве ловушек мелкодисперсных осадков [Лисицын, 1991]. Однако в нашем случае глубина моря выступает несущественным фактором распределения ¹³⁷Cs в поверхностном слое донных осадков. По всей видимости, локальные свойства донных осадков (увеличение доли глинистых фракций и органического вещества) в конкретной точке отбора в большей степени определяют накопление радиоцезия.

В целом такая взаимосвязь отмечается в ряде опубликованных работ [Staunton et al., 2002; Zhang et al., 2025].

Таким образом, можно заключить, что для адекватной оценки и прогноза миграции техногенных радионуклидов, таких как ^{137}Cs , в донных осадках арктического шельфа в первую очередь необходимо учитывать локальные литолого-геохимические условия (гранулометрический и минералогический состав, содержание органического вещества), которые могут существенно варьировать даже в пределах одного батиметрического района со схожими отметками глубин.

Оценка параметров радиологической безопасности

Для оценки параметров радиологической безопасности, связанных с естественными радионуклидами, которые присутствуют в отложениях, выполнен расчет различных индексов. В качестве таких индексов, которые часто используются для оценки радиологической безопасности материалов (почвы, донные осадки, горные породы), рассмотрены: 1) поглощенная доза гамма-излучения (D_R), 2) радиевый эквивалент активности (Ra_{eq}) и 3) индекс внешней опасности (H_{ex}) [UNSCEAR..., 2000].

Расчет поглощенной дозы гамма-излучения D_R выполнен согласно рекомендациям МАГАТЭ [UNSCEAR..., 2000]:

$$D_R = 0,462C_{Ra} + 0,604C_{Th} + 0,042C_K,$$

где D_R – мощность поглощенной дозы в нГр/ч, а C_{Ra} , C_{Th} и C_K – удельная активность ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в Бк/кг.

Радиевый эквивалент активности Ra_{eq} определялся в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [Exposure..., 1979]:

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1,43C_{Th} + 0,07C_K,$$

где Ra_{eq} – радиевый эквивалент активности, C_{Ra} , C_{Th} и C_K – удельная активность ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в Бк/кг.

Индекс внешней опасности H_{ex} , который характеризует опасность внешнего гамма-излучения, определялся согласно формуле из работы [IAEA..., 2013]:

$$Ra_{eq} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \leq 1,$$

где H_{ex} – индекс внешней опасности, C_{Ra} , C_{Th} и C_K – удельная активность ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в Бк/кг. Данный индекс применяется для ограничения дозы облучения в 1 мЗв/год [IAEA..., 2013].

Данные расчета индексов радиологической безопасности представлены в табл. 2 в виде минимальных, максимальных и средних значений для донных осадков северо-восточной части Баренцева моря. Так, индекс D_R для донных осадков северо-восточной части Баренцева моря варьирует в диапазоне от 37,4 до 68,6 нГр/ч, среднее значение составляет 54,2 (табл. 2). Видно, что среднее значение D_R ниже среднемировых значений согласно [UNSCEAR..., 2000].

Значение радиевого эквивалента активности Ra_{eq} для донных осадков варьирует в пределах 71,4–137,6 Бк/кг при средней величине 107,0 Бк/кг (табл. 2). Как видно из представленных данных, индекс Ra_{eq} не превышает максимального значения 370 Бк/кг, установленного Агентством по ядерной энергетике [Exposure..., 1979].

Рассчитанное значение индекса H_{ex} в донных осадках изменяется от 0,20 до 0,39 при среднем значении 0,30 (табл. 2). Для всех изученных проб донных осадков индекс внешней опасности значительно ниже 1, что говорит о дозе облучения меньше допустимого предела 1 мЗв/год.

Таблица 2. Параметры расчетных индексов радиологической безопасности донных отложений северо-восточной части Баренцева моря

Table 2. Parameters of calculated radiological safety indices for bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea

Параметр Index	D_R , нГр/ч D_R , nGy/h	Ra_{eq} , Бк/кг Ra_{eq} , Bq/kg	H_{ex} , отн. ед. H_{ex} , rel. units
Минимум Minimum	37,4	71,4	0,20
Максимум Maximum	68,6	137,6	0,39
Среднее Average	54,2	107,0	0,30
Среднемировое значение World average value [36] ??	59	370	< 1

Таким образом, на основании представленных расчетных данных по оценке индексов радиационной безопасности можно отметить, что радиозоологические риски от естественных радионуклидов, содержащихся в донных осадках северо-восточной части Баренцева моря, в настоящее время являются низкими и не представляют угрозы для биоты.

Выводы

Текущий уровень техногенного загрязнения донных отложений северо-восточной части Баренцева моря, оцененный по активности ^{137}Cs , характеризуется как крайне низкий. Это свидетельствует о продолжающемся снижении глобального поступления техногенных радионуклидов в арктическую морскую среду. Отсутствие короткоживущих изотопов (^{134}Cs , ^{60}Co) подтверждает отсутствие современных источников поступления в изученном районе.

Активность природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K находится в пределах региональных фоновых значений. Относительно высокие значения активности ^{40}K (до 790 Бк/кг) связаны с терригенным материалом, поступающим с побережья Новой Земли, что подтверждается геохимическими данными. Корреляционный анализ показал, что накопление естественных радионуклидов (^{226}Ra и ^{232}Th) тесно связано с содержанием тонкодисперсных фракций (< 45 мкм) и органического вещества в осадках.

В отличие от них накопление ^{40}K не имеет выраженной связи с гранулометрическим составом, что указывает на неравномерное распределение его минералов-носителей по фракциям.

Для техногенного ^{137}Cs характерны сходные с естественными радионуклидами геохимические механизмы накопления: ключевую роль играют локальные условия седиментации и сорбции, тогда как глубина моря не является значимым фактором для его распределения в поверхностном слое осадков. Рассчитанные индексы радиологической безопасности (D_R , Ra_{eq} , H_{ex}) не превышают установленных нормативных пределов, что свидетельствует об отсутствии радиационной угрозы для морских экосистем на современном этапе.

Таким образом, полученные сведения дополняют актуальную базу данных о радиозоологическом состоянии морской среды Арктики. Показано, что морские донные осадки выступают важным архивом естественных и техногенных радионуклидов, делая их приоритетным объектом для последующего мониторинга в контексте потенциальных рисков, связанных с климатическими изменениями и техногенным воздействием. Выявленные закономерности накопления радионуклидов определяют необходимость продолжения системного мониторинга радиозоологического состояния акватории Баренцева моря, учитывая ее уязвимость перед климатическими и антропогенными изменениями в Арктике.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Appendix 1

Координаты точек отбора проб, глубина моря и удельная активность радионуклидов в донных отложениях северо-восточной части Баренцева моря

Sampling point coordinates, depth and radionuclide specific activity in bottom sediments of the northeastern part of the Barents Sea

Шифр пробы Sample code	Координаты Coordinates		Глубина моря, м Sea depth, m	Удельная активность радионуклидов (± погрешность измерения), Бк/кг Radionuclide specific activities (± measurement error), Bq/kg			
	N	E		^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Ст-3	75.36667	54.76667	223	$2,5 \pm 0,5$	$20,3 \pm 2,2$	$28 \pm 2,5$	650 ± 59
Ст-4	75.55000	54.16667	115	$1,3 \pm 0,4$	$17,7 \pm 1,9$	$21 \pm 2,3$	530 ± 48
Ст-5	75.73333	53.56667	130	$< 0,3$	$15,8 \pm 2,5$	$22 \pm 3,1$	660 ± 86
Ст-6	75.93333	52.95000	120	$< 0,5$	$15,1 \pm 1,7$	$21 \pm 2,3$	660 ± 59
Ст-7	76.13333	52.33333	168	$< 0,3$	$12,7 \pm 1,8$	$16,6 \pm 1,7$	610 ± 49
Ст-8	76.26667	51.85000	281	$< 0,4$	$13 \pm 1,4$	$18,6 \pm 1,7$	530 ± 37
Ст-9	76.40000	51.45000	338	$1,3 \pm 0,4$	$21,8 \pm 2,2$	$33 \pm 3,3$	720 ± 65
Ст-10	76.66667	50.58333	349	$2,6 \pm 0,6$	$30 \pm 2,7$	$37 \pm 3,7$	710 ± 57
Ст-11	76.93333	49.61667	329	$1,4 \pm 0,4$	$28,2 \pm 2,5$	$37,1 \pm 3,0$	670 ± 54
Ст-12	77.20000	48.70333	263	$2,1 \pm 0,4$	$23,7 \pm 2,4$	$36 \pm 3,2$	730 ± 66
Ст-13	77.46667	47.76667	239	$1,7 \pm 0,4$	$24,2 \pm 2,4$	$35 \pm 3,9$	720 ± 65

Окончание прил. 1
Appendix 1 (continued)

Шифр пробы Sample code	Координаты Coordinates		Глубина моря, м Sea depth, m	Удельная активность радионуклидов (± погрешность измерения), Бк/кг Radionuclide specific activities (± measurement error), Bq/kg			
	N	E		¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Ст-14	77.68333	46.95667	233	2,1 ± 0,5	25,5 ± 2,3	35 ± 3,5	730 ± 66
Ст-15	77.90000	46.13333	269	1,7 ± 0,5	25,1 ± 2,5	33 ± 3,6	710 ± 64
Ст-16	78.16667	45.16667	297	2,8 ± 0,5	28,6 ± 2,9	39 ± 4,3	680 ± 61
Ст-17	78.43000	44.06000	231	2,3 ± 0,5	25,5 ± 2,6	40 ± 4,0	680 ± 61
Ст-18	78.69167	43.00333	255	< 0,5	22,5 ± 2,0	27,1 ± 2,4	680 ± 54
Ст-19	78.96667	41.95500	449	1,0 ± 0,6	29,3 ± 2,9	39 ± 3,1	750 ± 60
Ст-20	79.00000	42.94000	360	2,2 ± 0,7	24,3 ± 2,2	32,1 ± 2,6	670 ± 54
Ст-21	79.08000	43.79000	238	1,3 ± 0,5	18,9 ± 1,7	23,8 ± 2,1	570 ± 46
Ст-22	79.15000	44.49000	189	< 0,2	13,5 ± 1,6	20,3 ± 2,0	520 ± 42
Ст-23	79.22667	45.41667	88	< 0,4	14 ± 2,2	20 ± 3,2	570 ± 80
Ст-24	79.30833	46.47167	79	< 0,2	10,3 ± 1,4	15,8 ± 1,7	550 ± 50
Ст-25	79.39667	47.42500	265	1,1 ± 0,3	20,7 ± 2,3	29 ± 3,2	710 ± 64
Ст-26	79.49500	48.58000	310	3,0 ± 0,7	23,1 ± 2,3	31 ± 3,1	670 ± 60
Ст-27	79.60000	49.70667	278	3,3 ± 0,6	23,9 ± 2,4	32 ± 3,5	600 ± 54
Ст2-1	78.90200	53.70581	294	1,6 ± 0,8	22,9 ± 2,5	31 ± 2,8	650 ± 52
Ст2-2	78.69333	54.39333	250	1,7 ± 0,4	21,9 ± 2,2	29 ± 3,2	650 ± 59
Ст2-3	78.47393	55.11579	236	2,2 ± 0,5	26,5 ± 2,9	37 ± 3,7	680 ± 61
Ст2-4	78.25946	55.79301	169	1,1 ± 0,7	15,5 ± 1,9	23,4 ± 2,1	610 ± 49
Ст2-5	78.06035	56.38600	176	1,4 ± 0,4	18,3 ± 1,8	24,6 ± 2,7	610 ± 55
Ст2-6	77.92327	56.87098	274	1,3 ± 0,5	20,7 ± 2,1	28,9 ± 2,3	650 ± 52
Ст2-7	77.77667	57.28667	340	< 0,4	14,8 ± 1,9	24,6 ± 2,2	550 ± 44
Ст2-8	77.55833	57.91333	140	< 0,5	13,5 ± 1,8	18,7 ± 1,9	670 ± 54
Ст2-9	77.35000	58.53333	207	< 0,69	13,1 ± 1,4	20,8 ± 2,1	790 ± 71
Ст2-10	77.10289	59.28353	210	1,8 ± 0,5	21,8 ± 2,0	28,4 ± 2,8	680 ± 54
Ст2-11	76.89498	59.88595	252	2,6 ± 0,5	19,5 ± 2,1	29 ± 3,2	690 ± 62
Ст2-12	76.68333	60.50000	270	1,5 ± 0,4	15,6 ± 1,7	22,5 ± 2,3	570 ± 51
Ст2-13	76.53755	60.95939	84	1,8 ± 0,4	21,5 ± 2,2	30,9 ± 2,8	720 ± 65
Ст2-14	76.38622	61.31089	76	1,6 ± 0,5	25,4 ± 2,3	36 ± 3,2	780 ± 70

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Appendix 2

Координаты точек отбора проб, гранулометрический состав, физико-химические параметры в донных отложениях северо-восточной части Баренцева моря

Sampling point coordinates, grain size composition, physicochemical parameters in bottom sediments of the north-eastern part of the Barents Sea

Шифр пробы Sample code	Координаты Coordinates		Гранулометрический состав, % Grain size composition, %									Физико-химические параметры, % Physicochemical parameters, %		
	N	E	>10 мм >10 mm	4	2-4 мм 2-4 mm	1-2 мм 1-2 mm	0,5-1 мм 0,5-1 mm	250 мкм 250 µm	100 мкм 100 µm	45 мкм 45 µm	<45 мкм <45 µm	Зольность Ash content	ОВ* OM*	CO ₃ ²⁻
Ст-3	75.36667	54.76667	0	0	0	0	4,7	17,8	25,6	11,8	40,0	91,64	5,91	1,30
Ст-4	75.55000	54.16667	3,8	4,1	3,8	2,3	2,3	15,5	38,0	12,2	17,8	92,92	5,83	1,90
Ст-5	75.73333	53.56667	0,9	0,2	0,3	0,3	1,3	11,7	57,6	15,2	12,4	94,31	4,63	1,97
Ст-6	75.93333	52.95000	0	0	0,2	0,5	0,2	4,3	60,4	25,5	8,9	95,98	3,26	1,49
Ст-7	76.13333	52.33333	11,9	2,6	2,1	1,4	1,2	8,8	63,2	7,1	1,7	97,83	1,71	0,82
Ст-8	76.26667	51.85000	12,3	3,7	5,4	2,9	3,0	10,2	59,6	2,1	0,9	97,75	1,72	0,72
Ст-9	76.40000	51.45000	0	0	0	0	2,8	16,7	39,6	20,2	20,7	90,61	7,17	2,17
Ст-10	76.66667	50.58333	0	0	0	0	0	25,0	34,3	14,7	26,0	85,17	11,49	4,81
Ст-11	76.93333	49.61667	0	0	0	0	0	24,7	33,0	18,9	23,3	84,83	11,59	4,56
Ст-12	77.20000	48.70333	0	0	0	0	8,3	18,8	25,5	19,6	27,7	84,35	12,34	6,37

Окончание прил. 2
Appendix 2 (continued)

Шифр пробы Sample code	Координаты Coordinates		Гранулометрический состав, % Grain size composition, %										Физико-химические параметры, % Physicochemical parameters, %		
	N	E	>10 мм >10 mm	4	2–4 мм 2–4 mm	1–2 мм 1–2 mm	0,5–1 мм 0.5–1 mm	250 мкм 250 µm	100 мкм 100 µm	45 мкм 45 µm	<45 мкм <45 µm	Зольность Ash content	ОВ* OM*	CO ₃ ²⁻	
Ст-13	77.46667	47.76667	0	0	0	0	0	13,8	32,6	20,3	33,2	87,56	9,56	3,64	
Ст-14	77.68333	46.95667	0	0	0	0	5,5	19,5	29,1	17,1	28,8	87,75	9,45	3,14	
Ст-15	77.90000	46.13333	0	0	0	0	4,3	19,1	31,6	18,2	26,8	85,96	10,06	2,79	
Ст-16	78.16667	45.16667	0	0	0	0	3,3	22,2	30,0	16,1	28,3	84,79	12,20	4,03	
Ст-17	78.43000	44.06000	0	0	0	0	0	11,2	32,8	19,0	37,1	87,74	8,54	2,32	
Ст-18	78.69167	43.00333	0	0	0	0	1,2	9,4	31,4	31,1	26,9	91,17	6,42	1,95	
Ст-19	78.96667	41.95500	0	0	0	0	6,0	23,7	31,8	13,8	24,7	86,41	10,21	3,09	
Ст-20	79.00000	42.94000	0	0	0	0	1,0	10,1	32,9	30,3	25,7	89,90	7,48	2,47	
Ст-21	79.08000	43.79000	0	0	0	0,8	1,1	10,4	44,8	23,7	19,2	92,11	6,02	2,13	
Ст-22	79.15000	44.49000	0	0	0	0	0	12,4	65,3	11,7	10,5	94,19	3,57	0,85	
Ст-23	79.22667	45.41667	0	0	0,3	1,0	2,4	19,9	52,1	12,0	12,4	96,77	2,66	0,70	
Ст-24	79.30833	46.47167	0	0	0,1	0,3	0,3	12,9	79,6	4,7	2,1	97,87	1,69	0,84	
Ст-25	79.39667	47.42500	0	0	0	0	3,1	13,8	29,0	21,7	32,4	90,18	7,83	2,68	
Ст-26	79.49500	48.58000	0	0	0	0	1,9	16,7	32,6	20,5	28,4	87,47	9,13	2,76	
Ст-27	79.60000	49.70667	0	0	0	0	2,1	18,6	31,7	16,6	31,0	86,81	9,67	2,50	
Ст2-1	78.90200	53.70581	0	0	0	0	0,4	9,7	36,8	29,9	23,2	88,34	8,50	3,37	
Ст2-2	78.69333	54.39333	2,8	0,4	0,4	0,5	2,5	16,0	39,4	20,4	17,7	89,99	6,96	1,88	
Ст2-3	78.47393	55.11579	0	0	0,2	0,4	5,8	20,2	28,1	16,1	29,1	86,41	8,89	2,77	
Ст2-4	78.25946	55.79301	0	0	0,5	0,9	0,8	8,6	63,5	13,7	12,2	91,28	4,58	1,55	
Ст2-5	78.06035	56.38600	0	0	0,3	0,3	0,6	11,4	49,9	19,3	18,3	88,54	5,84	1,85	
Ст2-6	77.92327	56.87098	0	0	0	0	0,7	5,9	44,9	28,2	20,3	92,75	5,19	1,67	
Ст2-7	77.77667	57.28667	18,5	4,1	2,9	2,0	3,8	16,5	36,4	8,1	7,7	94,68	3,67	1,30	
Ст2-8	77.55833	57.91333	4,1	1,6	0,8	1,2	1,8	13,5	69,0	6,6	1,3	96,41	3,12	1,05	
Ст2-9	77.35000	58.53333	0	0	0	0	0,5	2,6	81,5	10,4	5,1	94,13	4,45	2,55	
Ст2-10	77.10289	59.28353	0	0	0	0	0,5	11,9	27,4	30,6	29,6	90,27	7,65	2,46	
Ст2-11	76.89498	59.88595	0	0	0	0	1,7	20,7	31,9	14,3	31,4	85,77	11,40	3,66	
Ст2-12	76.68333	60.50000	2,4	0,4	1,1	1,3	1,9	11,5	52,9	14,7	13,7	92,54	6,05	1,76	
Ст2-13	76.53755	60.95939	14,1	16,9	3,8	3,0	4,7	18,2	14,5	7,7	17,1	88,13	9,81	4,47	
Ст2-14	76.38622	61.31089	7,0	6,3	5,5	2,7	10,5	23,3	20,6	8,8	15,3	88,12	10,26	4,48	

Примечание. *Органическое вещество, определенное по потерям при прокаливании (%).

Note. *Organic matter determined by loss on ignition (%).

Литература

Башмакова Е. П., Ульченко М. В. Развитие Северного морского пути и инфраструктуры арктической транспортной системы // Региональные проблемы преобразования экономики. 2019. № 12(110). С. 1–8. doi: 10.26726/1812-7096-2019-12-88-96

Величкин В. И., Воробьева Т. А., Евсеев А. В., Мирошников А. Ю. Радиоэкологическая ситуация и радиогеохимическое районирование северо-западных территорий России // Доклады Академии наук. 2013. Т. 453, № 3. С. 314–318. doi: 10.7868/S0869565213330220

Дибнер В. Д., Крылов А. Я. Абсолютный возраст терригенных компонентов верхнетриасовых юрских отложений Земли Франца-Иосифа и данные об источниках сноса их терригенного материала // Доклады АН СССР. 1970. Т. 191, № 6. С. 1361–1364.

Кобылянский В. В., Казеннов А. Ю., Кикнадзе О. Е. Подводные захоронения радиоактивных отходов в Арктике. Какова реальная угроза? // Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана: Сб. мат-лов 2-й Всерос. научн.-технич. конф. Новосибирск, 2012. С. 27–45.

Лисицын А. П. Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М.: Наука, 1991. 270 с.

Матишов Г. Г., Касаткина Н. Е., Усягина И. С. Техногенная радиоактивность вод центрального полярного бассейна и смежных акваторий Арктики // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 93–98. doi: 10.31857/S0869-5652485193-98

Мирошников А. Ю. Покровный ледник Северного острова (архипелаг Новая Земля) – новый источник радиоактивности в Арктике // Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген: Мат-лы конф. М., 2018. С. 1–5.

- Назаров В. И., Григорьев Г. А., Краснов О. С., Медведева Л. В. Экономическая оценка углеводородной сырьевой базы арктического шельфа России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2021. № 1. С. 1–22. doi: 10.17353/2070-5379/9_2021
- Никитин Д. С., Хуторской М. Д., Иванов Д. А., Горских П. П. Глубинное строение и нефтегазоносность северо-восточной части Баренцевоморского шельфа. М.: ГЕОС, 2020. 147 с.
- Пилясов А. Н., Котов А. В. Российская Арктика-2035: полимасштабный прогноз // Экономика региона. 2024. № 2. С. 1–15. doi: 10.17059/ekon.reg.2024-2-3
- Саркисов А. А., Сивинцев Ю. В., Высоцкий В. Л., Никитин В. С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей. М.: ИБРАЭ РАН, 2015. 320 с.
- Сивинцев Ю. В. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
- Сыч Ю. Г., Дубинко Л. В. Радиоэкологическая обстановка на архипелаге Новая Земля // Арктика. Экология и экономика. 2012. Т. 1, № 5. С. 48–59.
- Трапезников А. В. Миграция радионуклидов в пресноводных экосистемах. Екатеринбург: Уральский ун-т, 2007. 250 с.
- AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2016. 89 p.
- Dowdall M., Lepland A. Elevated levels of radium-226 and radium-228 in marine sediments of the Norwegian Trench ("Norskerenna") and Skagerak // Mar. Pollut. Bull. 2012. No. 64. P. 2069–2076.
- Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by an NEA Group of Experts. Paris: OECD Publ., 1979. 34 p.
- Evaluation of guidelines for exposures to technologically enhanced naturally occurring radioactive materials committee on evaluation of EPA guidelines for exposure to naturally occurring radioactive material. Washington (DC): National Academies Press; 1999. 294 p.
- Grigoryev A., Vladimirov M. The basic patterns of the distribution, migration and accumulation of radionuclides in the bottom sediment of the Baltic Sea // Baltic Region. 2011. Vol. 1. P. 54–60. doi: 10.5922/2079-8555-2011-1-7
- Gwynn J. P., Dowdall M., Lind B. The radiological environment of Svalbard. Strålevern Rapport 2004:2. Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2004.
- Gwynn J. P., Hatje V., Casacuberta N. The effect of climate change on sources of radionuclides to the marine environment // Commun. Earth Environ. 2024. Vol. 5. Art. 135. doi: 10.1038/s43247-024-01241-w
- IAEA. Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides. Safety standards series. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013. 117 p.
- IAEA. Radioactivity in the Arctic seas. Vienna: IAEA, 1999. 75 p.
- Ilin G. V., Kasatkina N. E., Moiseev D. V., Usyagina I. S. Infrastructure objects of the nuclear fleet as sources of radioactive contamination of the Barents Sea: waste repository in Guba Andreeva // Atomic Energy. 2017. Vol. 2. P. 131–137. doi: 10.1007/s10512-017-0247-7
- Kwiatkowski L., Torres O., Bopp L., Aumont O., Chamberlain M., Christian J. R., Dunne J. P., Gehlen M., Ilyina T., John J. G., Lenton A., Li H., Lovenduski N. S., Orr J. C., Palmieri J., Santana-Falcón Y., Schwinger J., Séférian R., Stock C. A., Tagliabue A., Takano Y., Tjiputra J., Toyama K., Tsujino H. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections // Biogeosci. 2020. Vol. 17. P. 3439–3470. doi: 10.5194/bg-17-3439-2020
- Lokas E., Mietelski J. W., Ketterer M. E., Kleszcz K., Wachniew P., Michalska S., Miecznik M. Sources and vertical distribution of ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in peat profiles from southwestern Spitsbergen // Appl. Geochem. 2013. Vol. 28. P. 100–108. doi: 10.1016/j.apgeochem.2012.10.027
- Matishov D. G., Matishov G. G. Radioecology in Northern European Seas. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 335 p.
- Matishov G. G., Matishov D. G., Usyagina I. S., Kasatkina N. E. Long-term dynamics of radioactive contamination in the Barents-Kara region (1960–2013) // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 458, no. 4. P. 473–479.
- Matishov G. G., Matishov D. G., Usyagina I. S., Kasatkina N. E., Pavelskaya E. V. Assessment of ^{137}Cs and ^{90}Sr fluxes in the Barents Sea // Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 439, no. 2. P. 1190–1195.
- Miroshnikov A. Yu., Laverov N. P., Chernov R. A., Kudikov A. V., Ysacheva A. A., Semenov I. N., Aliev R. A., Asadulin E. E., Gavrilov M. V. Radioecological investigations on the Northern Novaya Zemlya Archipelago // Oceanology. 2017. Vol. 1. P. 204–214. doi: 10.1134/S000143701701009X
- Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier, 2014. 51 p.
- Saniewski M., Borszcz T. ^{90}Sr and ^{137}Cs in Arctic echinoderms // Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol. 124, iss. 1. P. 563–568. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.07.068
- Singh B. K., Um W. Application of clay materials for sorption of radionuclides from waste solutions // Minerals. 2023. Vol. 13. Art. 239. doi: 10.3390/min13020239
- Skancke J., Nordam T. Long-term fate of Ra-226 originating from offshore produced water discharges. Trondheim: SINTEF, 2016. 23 p.
- Staunton S., Dumat C., Zsolnay A. Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils // J. Environ. Radioact. 2002. Vol. 58, no. 2–3. P. 163–173. doi: 10.1016/S0265-931X(01)00064-9
- UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations, 2000. (Report to the General Assembly with Annexes).
- Valentine P. Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains, providing a physical framework for ecological research and seabed management: U.S. Geological

Survey Scientific Investigations Report 2019–5073. 2019. 37 p. doi: 10.3133/sir20195073

Yakovlev E., Puchkov A. Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2020. Vol. 160. Art. 111571. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111571

Zaborska A. Sources of ^{137}Cs to an Arctic fjord (Hornsund, Svalbard) // *J. Environ. Radioact.* 2017. Vol. 180. P. 19–26. doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.021

Zhang F., Huang D., Liu J., Zhong Q., Chen G., Du J., Zhang J., Yu T. Spatiotemporal variation and transport of ^{137}Cs in the Beibu Gulf // *Mar. Pollut. Bull.* 2025. Vol. 212. Art. 117505. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.117505

References

AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme; 2016. 89 p.

Bashmakova E. P., Ul'chenko M. V. Development of the Northern Sea Route and infrastructure of the Arctic transport system. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ehkonomiki = Regional Problems of Economic Transformation*. 2019;12(110):1–8. (In Russ.). doi: 10.26726/1812-7096-2019-12-88-96

Dibner V. D., Krylov A. Ya. Absolute age of terrigenous components of the Upper Triassic–Jurassic deposits of Franz Josef Land and data on sources of terrigenous material. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceed. of the USSR Academy of Sciences*. 1970;191(6): 1361–1364. (In Russ.)

Dowdall M., Lepland A. Elevated levels of radium-226 and radium-228 in marine sediments of the Norwegian Trench (“Norskerenna”) and Skagerak. *Mar. Pollut. Bull.* 2012;64:2069–2076.

Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by an NEA Group of Experts. Paris: OECD Publ.; 1979. 34 p.

Evaluation of guidelines for exposures to technologically enhanced naturally occurring radioactive materials committee on evaluation of EPA guidelines for exposure to naturally occurring radioactive material. Washington (DC): National Academies Press; 1999. 294 p.

Grigoryev A., Vladimirov M. The basic patterns of the distribution, migration and accumulation of radionuclides in the bottom sediment of the Baltic Sea. *Baltic Region*. 2011;1:54–60. doi: 10.5922/2079-8555-2011-1-7

Gwynn J. P., Dowdall M., Lind B. The radiological environment of Svalbard. Strålevern Rapport 2004:2. Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority; 2004.

Gwynn J. P., Hatje V., Casacuberta N. The effect of climate change on sources of radionuclides to the marine environment. *Commun. Earth Environ.* 2024;5:135. doi: 10.1038/s43247-024-01241-w

IAEA. Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides. Safety standards series. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 117 p.

IAEA. Radioactivity in the Arctic seas. Vienna: IAEA; 1999. 75 p.

Ilin G. V., Kasatkina N. E., Moiseev D. V., Usyagina I. S. Infrastructure objects of the nuclear fleet as sources of radioactive contamination of the Barents Sea: waste repository in Guba Andreeva. *Atomic Energy*. 2017;2:131–137. doi: 10.1007/s10512-017-0247-7

Kobylyanskii V. V., Kazennov A. Yu., Kiknadze O. E. Underwater disposal of radioactive waste in the Arctic. What is the real threat? *Nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie issledovaniy i osvoeniya shel'fa Severnogo Ledovitogo okeana: Sb. mat-lov 2-i Vseros. nauchn.-tekhnich. konf. = Scientific and technical support for research and development of the Arctic Ocean shelf: Proceed. 2nd All-Russ. scientific and technical conf.* Novosibirsk; 2012. P. 27–45. (In Russ.)

Kwiatkowski L., Torres O., Bopp L., Aumont O., Chamberlain M., Christian J. R., Dunne J. P., Gehlen M., Ilyina T., John J. G., Lenton A., Li H., Lovenduski N. S., Orr J. C., Palmieri J., Santana-Falcón Y., Schwinger J., Séférian R., Stock C. A., Tagliabue A., Takano Y., Tjiputra J., Toyama K., Tsujino H. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosci.* 2020;17:3439–3470. doi: 10.5194/bg-17-3439-2020

Lisitsyn A. P. Processes of terrigenous sedimentation in seas and oceans. Moscow: Nauka; 1991. 270 p. (In Russ.)

Lokas E., Mietelski J. W., Ketterer M. E., Kleszcz K., Wachniew P., Michalska S., Miecznik M. Sources and vertical distribution of ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in peat profiles from southwestern Spitsbergen. *Appl. Geochem.* 2013;28:100–108. doi: 10.1016/j.apgeochem.2012.10.027

Matishov G. G., Kasatkina N. E., Usyagina I. S. Technogenic radioactivity of waters of the central Arctic basin and adjacent water areas. *Doklady Earth Sciences*. 2019; 485(1):288–292. doi: 10.1134/S1028334X19030073

Matishov D. G., Matishov G. G. Radioecology in Northern European Seas. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2004. 335 p.

Matishov G. G., Matishov D. G., Usyagina I. S., Kasatkina N. E. Long-term dynamics of radioactive contamination in the Barents-Kara region (1960–2013). *Doklady Earth Sciences*. 2014;458(4):473–479.

Matishov G. G., Matishov D. G., Usyagina I. S., Kasatkina N. E., Pavelskaya E. V. Assessment of ^{137}Cs and ^{90}Sr fluxes in the Barents Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2011;439(2):1190–1195.

Miroshnikov A. Yu. Cover glacier of the North Island (Novaya Zemlya Archipelago) – a new source of radioactivity in the Arctic. *Itogi ehkspeditsionnykh issledovaniy v 2018 godu v Mirovom okeane, vnutrennikh vodakh i na arkhipelage Shpitsbergen: Mat-ly konf. = Results of field research in 2018 in the World Ocean, inland waters, and on the Spitsbergen Archipelago: Proceed. conf.* Moscow; 2018. P. 1–5. (In Russ.)

Miroshnikov A. Yu., Laverov N. P., Chernov R. A., Kudikov A. V., Ysacheva A. A., Semenov I. N., Aliev R. A., Asadulin E. E., Gavrilov M. V. Radioecological investigations on the Northern Novaya Zemlya Archipelago. *Oceanology*. 2017;1:204–214. doi: 10.1134/S000143701701009X

Nazarov V. I., Grigor'ev G. A., Krasnov O. S., Medvedeva L. V. Economic assessment of the petroleum resource resources bearing Russian Arctic shelf. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Oil and Gas Geology: Theory and Practice*. 2021;1:1–22. (In Russ.). doi: 10.17353/2070-5379/9_2021

Nikitin D. S., Khutorskoy M. D., Ivanov D. A., Gorsikh P. P. Deep structure and oil and gas potential of the Barents Sea shelf north-eastern part. Moscow: GEOS; 2020. 147 P. (In Russ.)

Pilyasov A. N., Kotov A. V. Russian Arctic-2035: multi-scale forecast. *Ekonomika regiona = Regional Economy*. 2024;2:1–15. (In Russ.). doi: 10.17059/ekon.reg.2024-2-3

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier; 2014. 51 p.

Saniewski M., Borszcz T. ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in Arctic echinoderms. *Mar. Pollut. Bull.* 2017;124(1):563–568. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.07.068

Sarkisov A. A., Sivintsev Yu. V., Vysotskii V. L., Nikitin V. S. *The atomic legacy of the Cold War at the bottom of the Arctic. Radioecological and technical and economic problems of radiation rehabilitation of the seas*. Moscow: IBRAE RAN; 2015. 320 p. (In Russ.)

Singh B. K., Um W. Application of clay materials for sorption of radionuclides from waste solutions. *Minerals*. 2023;13(239). doi: 10.3390/min13020239

Sivintsev Yu. V. et al. Technogenic radionuclides in the seas surrounding Russia. Moscow: IzdAT; 2005. 624 p. (In Russ.)

Skancke J., Nordam T. Long-term fate of Ra-226 originating from offshore produced water discharges. Trondheim: SINTEF; 2016. 23 p.

Staunton S., Dumat C., Zsolnay A. Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils.

J. Environ. Radioact. 2002;58(2-3):163–173. doi: 10.1016/S0265-931X(01)00064-9

Sych Yu. G., Dubinko L. V. Radioecological situation on the Novaya Zemlya archipelago. *Arktika. Ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2012;1(5): 48–59. (In Russ.)

Trapeznikov A. V. *Radionuclide migration in freshwater ecosystems*. Yekaterinburg: Ural'skii un-t; 2007. 250 p. (In Russ.)

UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations; 2000. (Report to the General Assembly with Annexes).

Valentine P. Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains, providing a physical framework for ecological research and seabed management: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2019–5073. 2019. 37 P. doi: 10.3133/sir20195073

Velichkin V. I., Miroshnikov A. Y., Vorobyova T. A., Evseev A. V. Radioecological environment and radio-geochemical regionalization of Northwestern Russia. *Doklady Earth Sciences*. 2013;453(1):1154–1157. doi: 10.1134/S1028334X13110226

Yakovlev E., Puchkov A. Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 2020;160:111571. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111571

Zaborska A. Sources of ¹³⁷Cs to an Arctic fjord (Hornsund, Svalbard). *J. Environ. Radioact.* 2017;180: 19–26. doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.021

Zhang F., Huang D., Liu J., Zhong Q., Chen G., Du J., Zhang J., Yu T. Spatiotemporal variation and transport of ¹³⁷Cs in the Beibu Gulf. *Mar. Pollut. Bull.* 2025; 212:117505. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.117505

Поступила в редакцию / received: 22.04.2026; принята к публикации / accepted: 15.07.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Яковлев Евгений Юрьевич

канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией экологической радиологии

e-mail: yakov24lev99@mail.ru

Пучков Андрей Викторович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической радиологии

e-mail: andreypuchkov.fcicarctic@internet.ru

Липкина Ангелина Евгеньевна

магистрант кафедры геоэкологии

e-mail: lina.lipkina.01@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Yakovlev, Evgeny

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

Puchkov, Andrey

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

Lipkina, Angelina

Master's Student

УДК 574.583(285.2)(470.6)

СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЗООПЛАНКТОНА В ОЗЕРЕ ДОЛГОЕ (БЕЛАРУСЬ) В ПЕРИОД ЛЕТНЕЙ СТРАТИФИКАЦИИ И ВЕСЕННЕЙ ГОМОТЕРМИИ

В. В. Вежновец¹, М. Д. Журавлев¹, Д. Б. Власова²,
Н. Ю. Суховило^{2*}, Б. О. Цыденов³

¹ Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам
(ул. Академическая, 27, Минск, Беларусь, 220072)

² Белорусский государственный университет (ул. Независимости, 4, Минск,
Беларусь, 220030), *SukhoviloNY@bsu.by

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет
(пр. Ленина, 36, Томск, Россия, 634050)

Изучение зоопланктона актуально для понимания функционирования озерных экосистем, оценки биоразнообразия, а также для решения практических задач, связанных с рыбоводством, экологическим мониторингом и охраной водных ресурсов. Целью исследования являлся анализ влияния летней стратификации и весенней гомотермии на состав зоопланктона в оз. Долгое, его количественное развитие и вертикальное распределение. В весеннее и летнее время в сообществе пелагического зоопланктона оз. Долгое регистрировалось близкое по значению количество видов (21 и 22 соответственно). При почти одинаковом видовом богатстве летом ракообразные были представлены больше (59,1 %), а весной коловратки составили 66,7 % видового состава. Эти изменения происходили за счет отсутствия теплолюбивых ветвистоусых ракообразных. В июле в составе доминирующего комплекса была отмечена одна коловратка – *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879) – 18,8 %, из ветвистоусых наибольшую представленность в планктоне имели *Diaphanosoma brachyurum* (Lievin, 1848) – 7,7 % и *Daphnia cucullata* Sars, 1862 – 5,9 %. В марте более половины (58,2 %) численности составила холодноводная коловратка *Synchaeta cecilia* Rousselet, 1902. Реликтовый холодноводный *Limnocalanus macrurus* G. O. Sars, 1863, размножение которого приурочено к зимнему времени года, был представлен всеми стадиями развития и в сумме составил 24,4 % общей численности. Общая численность зоопланктона летом была в два раза выше, чем весной. Более низкие весенние значения численности обусловлены слабым к этому времени развитием ветвистоусых ракообразных. Вертикальное распределение зоопланктонного сообщества менялось в зависимости от сезона. В целом сохранялась наиболее высокая степень сосредоточения организмов в верхних слоях воды в течение обоих сезонов, но летом в приповерхностных водах она достигала 50 % численности в столбе воды, а весной только 25 %. Эти различия вызваны изменениями в видовом составе, особенностями распределения основных групп и сменной доминирующих видов.

Ключевые слова: зоопланктон; вертикальное распределение; Rotifera; Copepoda; Cladocera; весенняя гомотермия; термическая стратификация

Для цитирования: Вежновец В. В., Журавлев М. Д., Власова Д. Б., Суховило Н. Ю., Цыденов Б. О. Сравнение структурной организации зоопланктона в озере Долгое (Беларусь) в период летней стратификации и весенней гомотермии // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 87–102. doi: 10.17076/lim2264

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ (проекты № X23PHFM-001 и Б25MC-016), а также РНФ (проект № 24-47-10001).

V. V. Vezhnavevts¹, M. D. Zhurauliou¹, D. B. Vlasova², N. Yu. Sukhovilo^{2*}, B. O. Tsydenov³. COMPARISON OF THE STRUCTURAL ORGANIZATION OF ZOOPLANKTON IN LAKE DOLGOE (BELARUS) DURING SUMMER STRATIFICATION AND SPRING HOMOTHERMY

¹State Scientific and Practical Center for Bioresources of the National Academy of Sciences of Belarus (27 Akademicheskaya St., 220072 Minsk, Belarus)

²Belarusian State University (4 Nezavisimosti St., 220030 Minsk, Belarus), *SukhoviloNY@bsu.by

³Tomsk State University (36 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia)

The study of zooplankton is important for understanding the functioning of lake ecosystems, assessing biodiversity, and solving practical problems related to fish farming, environmental monitoring, and water resource protection. The aim of this study was to analyze the influence of summer stratification and spring homothermy on the composition of zooplankton in Lake Dolgoe, its quantitative development and vertical distribution. In spring and summer, the numbers of species in the pelagic zooplankton community of Lake Dolgoe were similar (21 and 22 species, respectively). While the species richness was almost identical, crustaceans were more abundant in summer (59.1 %), while in spring, rotifers accounted for 66.7 % of the species composition. These changes in the species composition were due to the absence of thermophilic cladocerans. In July, *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879) was the only rotifer in the dominant assemblage, accounting for 18.8 %. The most abundant cladocerans were *Diaphanosoma brachyurum* (Lievin, 1848) with 7.7 % and *Daphnia cucullata* Sars, 1862 with 5.9 %. In March, the cold-water rotifer *Synchaeta cecilia* Rousselet, 1902 accounted for more than half (58.2 %) of the total population. The relict cold-water rotifer *Limnocalanus macrurus* G. O. Sars, 1863, which breeds during the winter season, was represented by all developmental stages and constituted 24.4 % of the total population. The total zooplankton abundance was twice as high in summer as in spring. This decrease was primarily due to a decrease in the abundance of cladocerans. The vertical distribution of the zooplankton community varied seasonally. Overall, the concentration of organisms remained the highest in the upper water layers throughout both seasons, but the abundance in the surface water layers in summer reached 50 % of the total population, compared to only 25 % in spring. These differences are due to changes in the species composition, distribution patterns of the main groups, and changes in the dominant assemblage.

Keywords: zooplankton; vertical distribution; Rotifera; Copepoda; Cladocera; spring homothermy; thermal stratification

For citation: Vezhnavevts V. V., Zhurauliou M. D., Vlasova D. B., Sukhovilo N. Yu., Tsydenov B. O. Comparison of the structural organization of zooplankton in Lake Dolgoe (Belarus) during summer stratification and spring homothermy. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 87–102. doi: 10.17076/lim2264

Funding. The study was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (projects No. X23PHFM-001, Б25MC-016) and the Russian Science Foundation (project No. 24-47-10001).

Введение

Зоопланктон является значимым компонентом экосистемы водоема, он играет важную роль в трофических сетях, в самоочищении водоемов и водотоков, а также служит биологическим индикатором для оценки качества воды [Андроникова, 1996; Stamou et al., 2022; Declerck, de Senerpont Domis, 2023; Karpowicz et al., 2025]. Изучение зоопланктона актуально для понимания функционирования озерных экосистем, оценки биоразнообразия, а также для решения практических задач, связанных с рыбоводством, экологическим мониторингом и охраной водных ресурсов. Особый интерес вызывает исследование водоемов, являющихся местами обитания представителей реликтовых ракообразных, которые в условиях водоемов Беларуси находятся на южной границе ареала, подвержены риску вымирания и занесены в Красную книгу Республики Беларусь [2025]. Одним из таких озер является самое глубокое в Беларуси озеро Долгое.

В стратифицированных озерах зоопланктон в столбе воды распределяется неравномерно [Вежновец, Журавлев, 2022]. При использовании зоопланктона как индикаторного сообщества и в других целях важным аспектом является учет вертикальной структуры, потому что от того, где и как взяты пробы, зависят полученные при анализе фактические данные и их достоверность.

Вертикальному распределению зоопланктона посвящено множество работ [Добрынин, 2003; Zadereev, Tolomeyev, 2007; Вецлер, 2008; Речкалов, Голубок, 2013; Фомина, Сярки, 2015; Карпещук, 2018; Вежновец, Журавлев, 2026]. Как правило, они выполнены на озерах с термическим расслоением воды в летнее время. Круглогодичные или сезонные исследования встречаются реже [Вецлер, 2008; Doulka, Kehayias, 2011; Chalkia et al., 2012; Сярки, Фомина, 2020]. Однако сведения о вертикальном распределении зоопланктона в период гомотермии, при постоянной температуре в столбе воды и достаточном содержании кислорода, единичны.

В последние годы вертикальная структура зоопланктона в озерах Беларуси, которые относятся к равнинным водоемам средней полосы, активно исследуется. К настоящему времени для них установлены особенности вертикальной структуры пелагического зоопланктона в термически стратифицированных озерах разной трофности, при разном сочетании прозрачности, температуры и содержания кислорода [Вежновец, Журавлев, 2022]. Показано, что с ростом степени трофности и при снижении прозрачности наблюдается перемещение

зоопланктона в верхние слои воды. Летний зоопланктон озера Долгое достаточно хорошо изучен: определены видовой состав, численность и особенности вертикального распределения пелагического зоопланктона, установлены вертикальные профили всего планктона, основных групп и отдельных видов [Журавлев, 2023]. Показана приуроченность максимальных значений плотности животных к поверхностным хорошо прогреваемым и аэрируемым слоям воды эпилимниона. Определено, что большинство популяций имеют видовые особенности вертикального распределения и располагаются в определенных слоях воды, что позволяет уточнить их биотопическую приуроченность, границы толерантности и жизнедеятельности [Журавлев, 2023; Журавлев, Вежновец, 2025].

Большинство приведенных материалов по вертикальной структуре получены в летнее время. В течение года происходят значительные изменения в составе и вертикальном распределении зоопланктона. Эти изменения проходят под влиянием многих биотических и абиотических факторов, главными из которых являются наличие пищи, прозрачность, температура воды и содержание растворенного кислорода. Наиболее ярко годовые различия должны наблюдаться между термически стратифицированными и гомотермными условиями, которые наблюдаются летом, осенью и весной [Вецлер, 2008].

Целью исследования являлся анализ влияния летней стратификации и весенней гомотермии в озере Долгое на состав зоопланктона, его количественное развитие и вертикальное распределение.

Материалы и методы

Озеро Долгое расположено в Глубокском районе Витебской области, в бассейне р. Шоша, в 32 км на северо-восток от г. Глубокое и в 2 км на юго-восток от д. Зябки (ж/д станция Зябки). Гидрологический заказник республиканского значения. Озеро Долгое – самый глубокий естественный водоем Беларуси. Батиметрические данные взяты из работы [Паспортизация..., 1977]. Карта глубин озера Долгое представлена на рис. 1.

Котловина ложбинного происхождения, вытянута с северо-запада на юго-восток. В поперечном профиле котловина подобна ледниковой долине – трог, для которого характерно относительно плоское дно и крутые (30–40°) подводные склоны. Подводная ее часть отличается незначительной шириной литорали (глубины до 2 м составляют всего 10 % площади озера), склон сублиторали распространяется

до глубины 20 м и характеризуется значительной крутизной, на каждые 50 м расстояния глубины увеличиваются на 10–15 м. Плоское ложе озера осложнено несколькими глубокими впадинами, заполненными илами, которые чередуются с выступами – «усухами», в пределах которых глубины не превышают 20–22 м. Северо-западная и юго-восточная части озера мелководны. Максимальные глубины приурочены к центральной части (рис. 1). Морфометрические характеристики оз. Долгое приведены в табл. 1 [Власов и др., 2004]. Озеро является слабопроточным, период водообмена составляет приблизительно 12 лет. Впадающие водотоки представлены ручьями из озер Свядово и Псуя, а также двумя временными ручьями. Из озера Долгое вытекает протока в оз. Шо.

Ледостав зимой 2024/25 гг. по причине аномально теплой погоды в декабре и январе сформировался лишь в первой декаде февраля 2025 г. (примерно на месяц позже обычного) и окончательно разрушился 23–24 марта 2025 г. (в соответствии со средними сроками за последнее десятилетие).

Озеро является типичным димиктическим водоемом. Прямая температурная стратификация в 2025 г. начала формироваться в первой декаде апреля, однако поскольку весенние заморозки с низкими дневными температурами воздуха фиксировались вплоть до середины мая, возможно, происходило разрушение стратификации. Осеннее охлаждение водоема происходит, как правило, с последней декады августа до конца ноября – начала декабря. К началу декабря прямая стратификация разрушается.

Материалом для работы послужили сборы зоопланктона, отобранные на станции с максимальной глубиной 30 июля 2024 г., при летней температурной стратификации, и 27 марта 2025 г., в период формирования термобара, при весенней гомотермии, после схода льда [Суховило и др., 2025]. Для ловов использовали количественную замыкающую сеть Джели (входное отверстие сети 25 см, а ячейе фильтрующего конуса 62 мкм), проведен облов всего столба воды от поверхности до дна, через пять метров глубины (по 9 проб в каждый сезон) [Салазкин и др., 1984]. Пробы консервировали концентрированным формалином, доводя его конечную концентрацию до 4 %. Для определения численности зоопланктона часть пробы полностью просчитывали под стереомикроскопом МБС-9 в камере Богорова с уточнением морфологических особенностей животных с помощью микроскопа LeicaMD 1000.

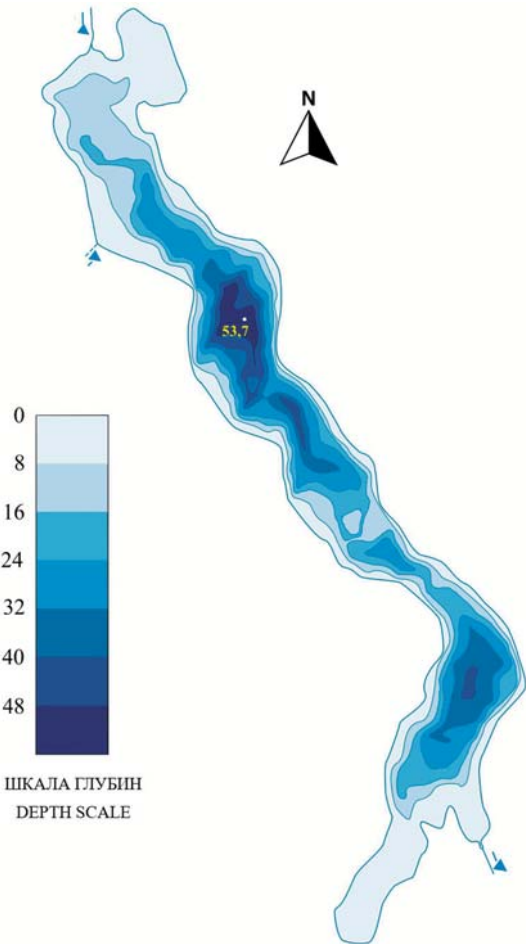


Рис. 1. Карта глубин оз. Долгое
Fig. 1. Depth map of Lake Dolgoye

Таблица 1. Морфометрические показатели оз. Долгое
Table 1. Morphometric indicators of Lake Dolgoye

Показатели Indicators	Значения показателей Values of the indicators
Площадь зеркала, км ² Water-surface area, km ²	2,60
Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²	30,40
Объем воды, млн м ³ Volume of water, m. km ³	43,17
Длина береговой линии, км Coastline length, km	14,90
Длина озера, км Lake length, km	6,00
Ширина максимальная, км Maximum width, km	0,70
Ширина средняя, км Average width, km	0,40
Глубина максимальная, м Maximum depth, m	53,60
Глубина средняя, м Average depth, m	16,60

Для определения таксономической принадлежности использовали работы [Кутикова, 1970; Монченко, 1974; Определитель..., 2010 и др.]. Разделение на стадии развития у лимнокалнуса проводили по собственным описаниям [Вежновец, 1984].

Результаты и обсуждение

Летние и весенние температурные условия в оз. Долгое представлены на рис. 2. Летом наблюдается четкое разделение водной толщи на эпилимнион (0–5 м) с температурой 22,5 °С, металимнион (5–11 м) со снижением температуры до 7,5 °С и гиполимнион, где температура начиная с 25 метров снизилась до величины 5,8–5,6 °С. Прозрачность воды в июле составляла 4,8 м. В марте 2025 г. при прозрачности

6,8 м температура во всей толще воды озера была постоянной – 3,0–3,1 °С.

В распределении концентрации кислорода по глубине в это время года постоянство наблюдается только в эпилимнионе [Журавлев, Вежновец, 2025]. Основные изменения наблюдаются в металимнионе, где есть и максимум на глубине 6 м со значением 9,2 мг/л, и минимум на глубине 9 м со значением 5,5 мг/л. Глубже, до 20 м, отмечено небольшое повышение концентрации до 6,9 мг/л, а затем – плавное снижение ко дну до 4,2 мг/л (рис. 3). В марте концентрация кислорода была постоянной на всех глубинах – 12,8–12,9 мг/л. Содержание кислорода в глубоководных слоях воды в этом водоеме благоприятное для развития водной фауны и холодолюбивых видов.

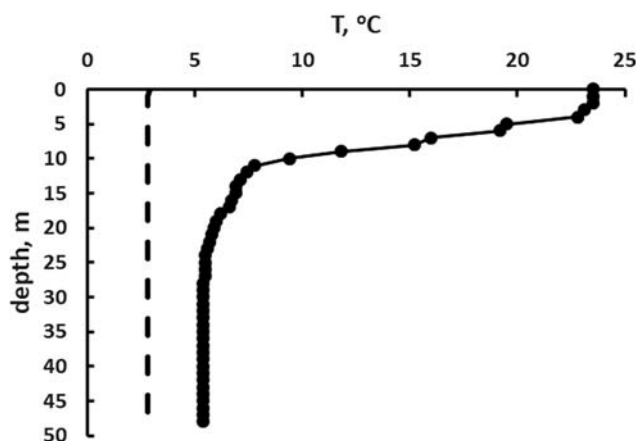


Рис. 2. Вертикальное изменение температуры воды в оз. Долгое.

Здесь и на рис. 3: сплошная линия – летом, прерывистая – весной

Fig. 2. Vertical temperature change in Lake Dolgoye.

Here and in Fig. 3: solid line – in summer, dashed line – in spring

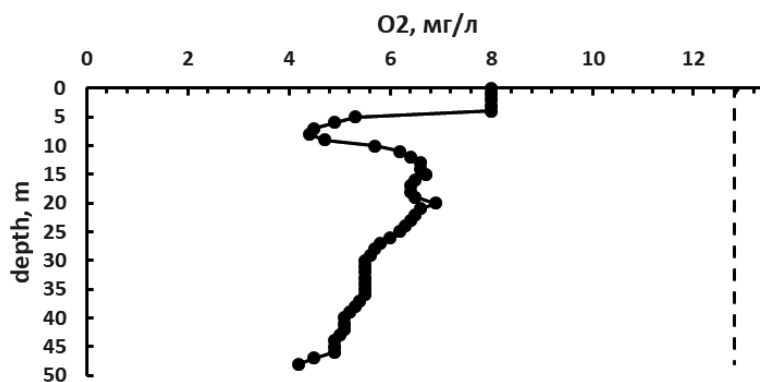


Рис. 3. Вертикальное распределение содержания кислорода (мг/л) в оз. Долгое

Fig. 3. Vertical distribution of oxygen concentration (O_2 , mg/L) in Lake Dolgoye

Общее количество найденных видов оставалось практически постоянным в оба срока наблюдений: 24 в июле и 21 в марте (табл. 2). Однако соотношение представленности групп в зоопланктоне резко различалось. Больше число видов наблюдалось у коловраток весной, когда оно достигло 14 при летних значениях 9. Видовой состав этой группы в дополнение к круглогодичным видам весной пополнился холодолюбивыми *Conochiloides natans*, *Notholca squamula squamula* и *Synchaeta cecilia*. На зимний период из планктона выпали теплолюбивые ракообразные, поэтому весной наиболее значительные изменения отмечены у ветвистоусых – из 10 видов, зарегистрированных в июле, в весеннем планктоне были представлены только 3. У веслоногих раков общее количество почти не изменилось, но обычные в прогреваемом эпилимнионе летом циклопы *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) и *Thermocyclops oithonoides* Sars, 1863 не встречены весной.

В целом видовое богатство планктона (35 видов) пелагиали озера сопоставимо с аналогичным параметром других мезотрофных озер Беларуси [Вежновец, Журавлев, 2022] и состоит приблизительно в одинаковой пропорции из коловраток и ракообразных, но отличается по сезонам: летом на 63 % определялось ракообразными, а весной на 67 % коловратками. В архивных данных лаборатории озераведения БГУ содержится информация о бедном видовом разнообразии зоопланктона в оз. Долгое, включающем около 30 видов.

Средняя численность в столбе воды была невысокой в оба сезона, что характеризует озеро как мезотрофное с чертами олиготрофии [Крючкова, 1987; Неверова-Дзюпак, Цветкова, 2020], при этом весной численность почти в два раза ниже (табл. 3). Соотношение основных групп в общей численности менялось значительно: летом в планктоне преобладали веслоногие ракообразные с долей 44,7 %, а весной доминировали коловратки – 68 % от общей численности.

Величины биомассы в летнее время, примерно равные 0,5 г/м³, подтверждают признаки олиготрофии этого водоема. Разница в величинах биомассы между июлем и мартом достигала 20 раз, основу биомассы в оба периода наблюдений (84,1–91,2 %) составляли веслоногие ракообразные.

В июле науплиальные и копеподитные стадии развития копепод в сумме составили 29,4 % общей численности. Из веслоногих *Eudiaptomus graciloides* и реликтовая копепода *Limnocalanus macrurus* были в субдоминантах с относительной численностью 6,7 и 6,3 % соответственно.

Таблица 2. Видовой состав зоопланктона летом и весной

Table 2. Species composition of zooplankton in summer and spring

Виды Species	Июль July	Март March
Rotifera		
<i>Ascomorpha ecaudis</i> Perty, 1850	-	x
<i>Asplanchna priodonta priodonta</i> Gosse, 1850	-	x
<i>Collotheca pelagica</i> (Rousselet, 1893)	x	x
<i>Conochilus unicornis</i> Rousselet, 1892	x	x
<i>Conochiloides natans</i> (Seligo, 1900)	-	x
<i>Filinia maior</i> (Colditz, 1914)	-	x
<i>Gastropus stylifer</i> Imhof, 1891	x	-
<i>Kellicottia longispina longispina</i> (Kellicott, 1879)	x	x
<i>Keratella cochlearis cochlearis</i> (Gosse, 1851)	x	x
<i>K. hiemalis</i> Carlin, 1943	-	x
<i>K. quadrata quadrata</i> (Müller, 1786)	-	x
<i>Notholca squamula squamula</i> (Müller, 1786)	-	x
<i>Ploesoma hudsoni</i> (Imhof, 1891)	x	-
<i>Polyarthra dolichoptera dolichoptera</i> Idelson, 1925	x	x
<i>P. remata</i> Skorikov, 1896	x	-
<i>Synchaeta cecilia</i> Rousselet, 1902	-	x
<i>S. pectinata</i> Ehrenberg, 1832	-	x
<i>Trichocerca capucina</i> (Wierzejski et Zacharias, 1893)	x	-
18	9	14
Copepoda		
<i>Cyclops bohater</i> Kozminski, 1933	-	x
<i>C. vicinis vicinus</i> Uljanin, 1875	-	x
<i>Eudiaptomus graciloides</i> (Lilljeborg, 1888)	x	x
<i>Limnocalanus macrurus</i> G. O. Sars, 1863	x	x
<i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus, 1857)	x	-
<i>Thermocyclops oithonoides</i> Sars, 1863	x	-
<i>Heterocope appendiculata</i> Sars, 1863	x	-
7	5	4
Cladocera		
<i>Bosmina coregoni coregoni</i> Baird, 1857	x	x
<i>B. longispina</i> Leydig, 1860	x	-
<i>Bosmina</i> sp.	x	x
<i>Bythotrephes longimanus</i> Leydig, 1860	x	-
<i>Daphnia cristata</i> Sars, 1862	x	-
<i>D. cucullata</i> Sars, 1862	x	-
<i>D. longiremis</i> Sars, 1862	x	-
<i>D. longispina</i> (O. F. Muller, 1776)	x	x
<i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Liévin, 1848)	x	-
<i>Leptodora kindtii</i> (Focke, 1844)	x	-
10	10	3
Bcero / Total:	35	21

Таблица 3. Общая численность (N, тыс. экз./м³), биомасса (B, г/м³) и доля основных групп (%) летом и весной

Table 3. Total abundance (N, ind./m³), biomass (B, g/m³) and proportion of the main groups (%) in summer and spring

Основные группы Main groups	Июль July		Март March	
	N	%	N	%
Rotifera	6,808	28,2	8,567	68,2
Copepoda	10,801	44,7	3,984	31,7
Cladocera	6,555	27,1	0,009	0,1
Всего: Total:	24,164	100,0	12,560	100,0
	B	%	B	%
Rotifera	0,0022	0,4	0,0042	15,8
Copepoda	0,4943	91,2	0,0224	84,1
Cladocera	0,0455	8,4	0,0000	0,1
Всего: Total:	0,5420	100,0	0,0267	100,0

В июле в составе доминирующего комплекса была только одна коловратка *Kellicottia longispina* – 18,8 %. Из ветвистоусых ракообразных наибольшую представленность в планктоне имели *Diaphanosoma brachyurum* – 7,7 % и *Daphnia cucullata* – 5,9 %.

В марте состав доминантного комплекса сократился до 3 видов, более половины (58,2 %) численности которого составила холодноводная коловратка *Synchaeta cecilia*. Из коловраток в субдоминанты с относительной численностью 5,0 % вошла *Keratella cochlearis*. Холодноводный *L. macrurus*, размножение которого приурочено к холодному времени года, был представлен всеми стадиями развития и в сумме составил 24,4 % общей численности.

В биомассе в обе даты доминировали два крупных вида копепод: *E. graciloides* и *L. macrurus*, составляя в июле 29,72 и 55,96 %, а в марте 63,0 и 18,7 % общей биомассы соответственно. Остальные встреченные виды имели менее 5 % и не входили в доминантный комплекс, кроме коловратки *S. cecilia*, доля которой в биомассе, при высокой численности, составила 17,3 %.

Характер распределения зоопланктона в июле был тем же, что и десять последних лет ежегодных летних наблюдений (2014–2024) для этого озера [Журавлев, 2023; Журавлев, Вежновец, 2025]. Имелся максимум в эпилимнионе, соответствующем по мощности величине прозрачности воды, и некоторое увеличение численности в придонных горизонтах (рис. 4). За все время наблюдений (2006–2024 гг.) максимальное значение численности в слое 5–10 метров, что приблизительно соответствует металимниону, было только дважды – в 2006 и 2011 гг., когда в этом слое концентрировалось 43,4 и 50,1 % численности зоопланктона. В большинстве других озер Беларуси мезотрофного типа, сходных с озером Долгое по трофическим, температурным и кислородным условиям, летом максимум формируется в металимнионе [Вежновец, Журавлев, 2022], а в этом водоеме он почти всегда располагается в эпилимнионе, что связано с приуроченностью к указанным слоям воды в это время года не только теплолюбивых видов ракообразных, но и коловраток (рис. 5). В распределении основных групп летом наблюдается схожая картина. Максимальная плотность была в эпилимнионе, с самой высокой концентрацией здесь копепод разных стадий развития (64,8 %). У этой же группы наблюдался небольшой рост плотности ко дну за счет холодолюбивой фауны,

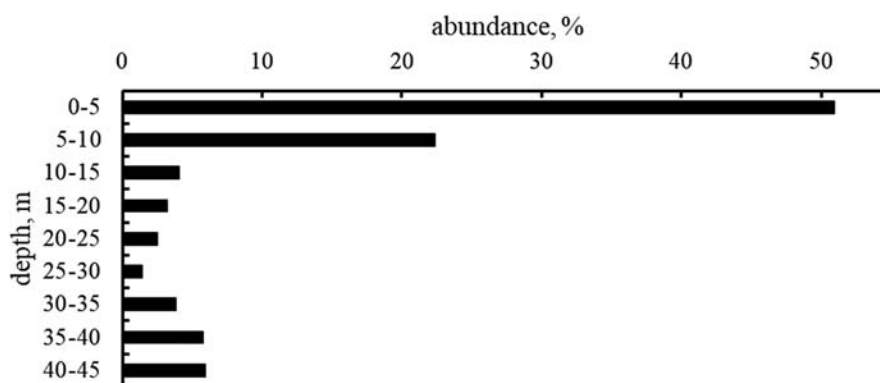


Рис. 4. Вертикальное распределение зоопланктона в июле

Fig. 4. Vertical distribution of zooplankton in July

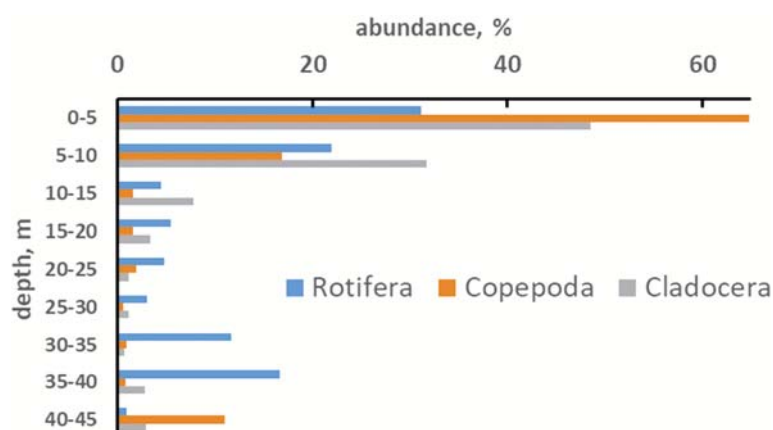


Рис. 5. Вертикальное распределение основных групп зоопланктона в июле

Fig. 5. Vertical distribution of the main groups of zooplankton in July

представленной лимнокалянусом. Около половины численности кладоцер (48,5 %) также отмечалось в эпилимнионе, ко дну их численность постепенно снижалась, а незначительный рост в глубоких слоях воды был за счет размещения здесь не определенного до вида представителя босмин (*Bosmina* sp.).

Если рассматривать распределение отдельных видов, то тепловодные виды ветвистоусых ракообразных, такие как *D. brachiurum* и *D. cucullata*, имеют максимальную плотность в эпилимнионе. В металимнионе концентрируются *D. longiremis* и *D. longispina*.

У коловраток большинство видов в этом озере летом также придерживаются приповерхностных слоев воды. Но доминирующий вид келликоттия имеет двухвершинное распределение, создавая максимумы в металимнионе

и даже в придонных слоях гипolimниона (рис. 6).

Высокая доля копепоид в эпилимнионе создавалась за счет младших стадий развития (науплиусов) циклопов, которые имели преимущество в летнем планктоне (11,4 % общей численности). Кроме того, здесь концентрировались и другие стадии развития копепоид, и такие виды, как *Thermocyclops oithonoides* Sars, 1863, *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) и *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg, 1888), которых можно отнести к теплолюбивым. Из холодолюбивой фауны распространенным видом является лимнокалянус, который присутствует в этом озере полвека [Вежновец, 2022]. Летом данный вид в водной толще распределялся неоднородно: наблюдалось два максимума численности на глубинах 5–10 м (металимнион)

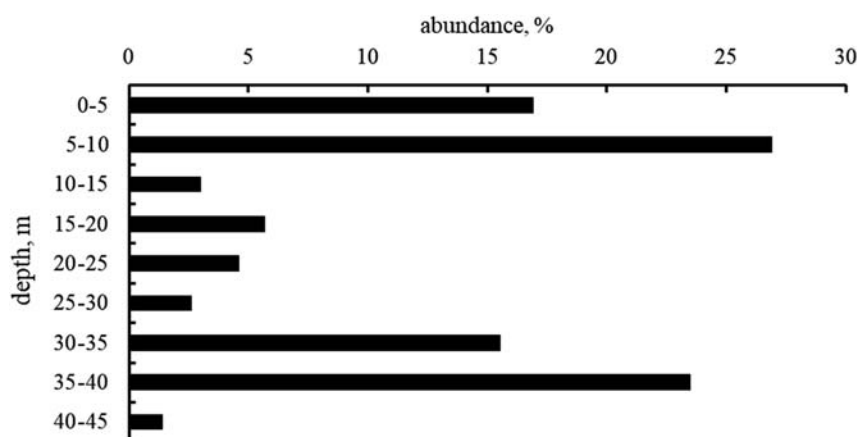


Рис. 6. Вертикальное распределение *Kellicottia longispina* летом

Fig. 6. Vertical distribution of *Kellicottia longispina* in summer

и 40–45 м (рис. 7). При этом около 75 % популяции в дневное время располагается глубже 30 м.

Распределение общей численности в марте при одинаковых температурных условиях и содержании кислорода во всех слоях воды было

неравномерным. В сравнении с летом максимальная концентрация хоть и сохранилась в поверхностных горизонтах, но со значениями в два раза ниже (рис. 8), а общее распределение было более равномерным, без придонного максимума.

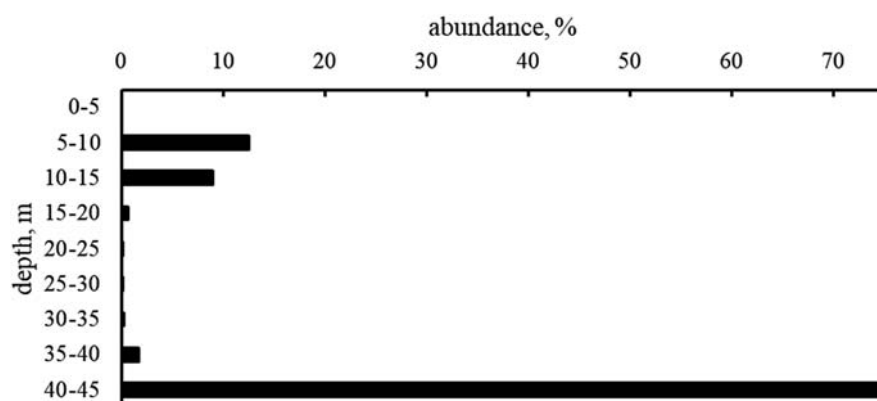


Рис. 7. Вертикальное распределение *Limnocalanus macrurus* летом
Fig. 7. Vertical distribution of *Limnocalanus macrurus* in summer

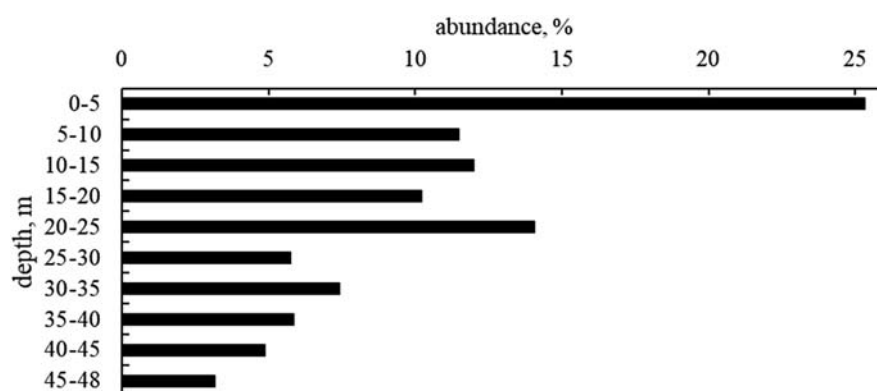


Рис. 8. Вертикальное распределение зоопланктона в марте
Fig. 8. Vertical distribution of zooplankton in March

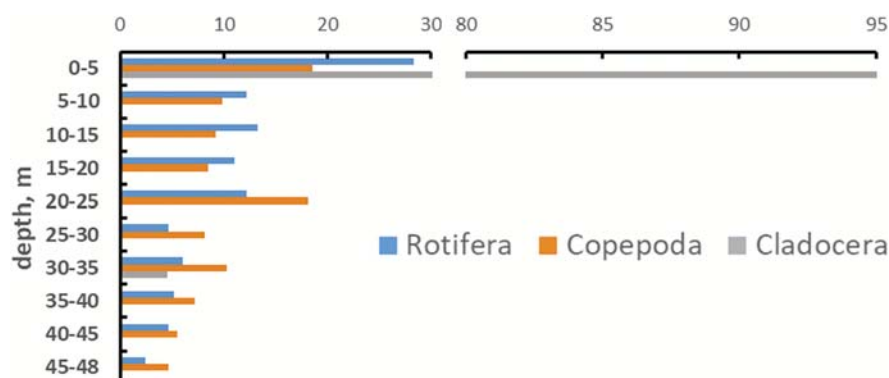


Рис. 9. Вертикальное распределение основных групп зоопланктона в марте
Fig. 9. Vertical distribution of the main groups of zooplankton in March

Весной распределение определялось коловратками и копеподами, их размещение в столбе воды относительно летнего было более равномерным (рис. 9), что может быть связано с температурными условиями и перемешиванием водных масс. У ветвистоусых ракообразных отмечены единичные особи босмин, которые и дали всплеск для этой группы в поверхностных слоях воды, на всех остальных глубинах эти животные не встречались, за исключением одной особи в горизонте 30–35 метров.

Влияние на общее распределение зоопланктона доминирующих видов весной можно продемонстрировать на примере распределения доминирующей коловратки *Synchaeta cecilia*, т. к. эти параметры схожи (рис. 8 и 10).

Из круглогодичных видов рассмотрено распределение лимнокалянуса, однако следует учесть, что в марте развивалась новая генерация этого моноциклического вида [Фомина, Сярки 2022] из яиц, отложенных зимой, и популяция была представлена почти всеми возрастными группами, а взрослые особи прошлогодней генерации в большинстве своем отмерли и остались только немногочисленные их экземпляры (рис. 11). Таким образом, в распределении различных стадий развития этой холодноводной копеподы максимум наблюдался в приповерхностных горизонтах – вероятно, более богатых кормовыми объектами. Характер распределения численности взрослых особей в целом схож с летним, с максимальными значениями на глубине 40–45 метров. При отсутствии лимитирования температурой небольшое количество взрослых животных встречается и в поверхностных слоях, чего не наблюдалось летом (рис. 11, в). Сходное сезонное распределение и встречаемость в верхних слоях воды в марте у этого

вида отмечены в Онежском озере [Фомина, Сярки, 2022].

В литературных источниках весеннее перемешивание и термобар используются, чтобы показать горизонтальное разделение [Авинский и др., 2000; Melnik et al., 2006] или перемещение [Likhoshway et al., 1995] планктона. Нами для сравнительных целей в озере Долгое использована только одна станция с максимальной глубиной, которая весной дольше всего остается в теплоинертной зоне.

Существующие исследования распределения зоопланктона в разные сезоны описывают разные вегетационные периоды, не всегда совпадающие с полным перемешиванием [Вецлер, 2008; Кипрушина, 2009; Сярки, Фомина, 2020], что затрудняет сопоставление результатов.

Распределение в озере Долгое в марте в общих чертах совпадало с весенним (май) распределением зоопланктона в обоих плесах карельского мезотрофного озера Мунозеро [Сярки, Фомина, 2020], с максимумом в слое 0–5 метров, но летом (июль) максимальные значения численности в Мунозере перемещались глубже (5–10 м), что наблюдается в других мезотрофных озерах Беларуси [Вежновец, Журавлев, 2022].

Одним из важнейших факторов в распределении зоопланктона может быть наличие и обилие пищи. Так, согласно [Dimante-Deimantovica et al., 2012], концентрация хлорофилла а была статистически наиболее значимым фактором окружающей среды, влияющим на вертикальное распределение зоопланктона в димиктических озерах Латвии.

Причины отличного от других мезотрофных озер Беларуси летнего распределения зоопланктона в озере Долгое пока мало поддаются объяснению. Эпилимнионный максимум

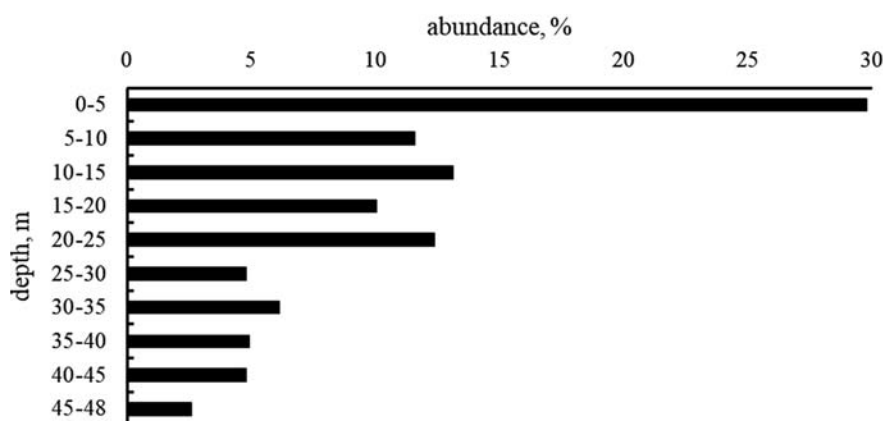


Рис. 10. Вертикальное распределение *Synchaeta cecilia* в марте

Fig. 10. Vertical distribution of *Synchaeta cecilia* in March

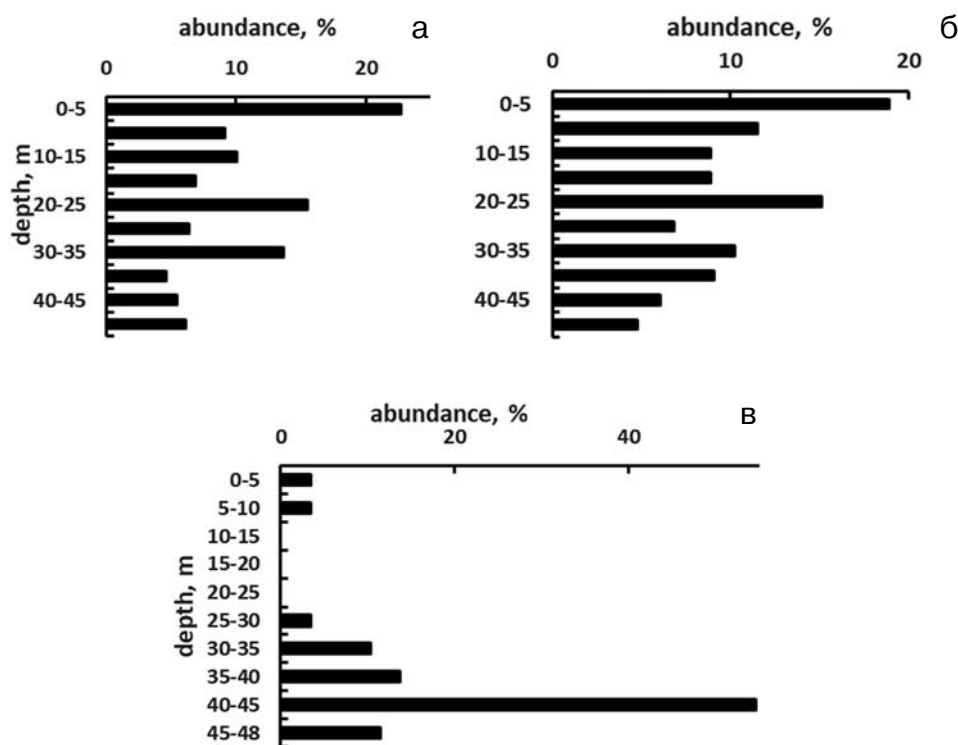


Рис. 11. Вертикальное распределение различных стадий развития лимнокалянуса в марте:

а – науплиусы, б – копеподиты, в – взрослые животные

Fig. 11. Vertical distribution of different stages of *Limnocalanus* development in March:

a – nauplii, б – copepodites, в – adult animals

зоопланктона более характерен для эвтрофных озер Беларуси [Вежновец, Журавлев, 2022], но по всем характеристикам озеро Долгое остается олигомезотрофным. Таким образом, пока это следует считать отличительной особенностью озера.

Во время весенней гомотермии, при постоянстве основных параметров среды в толще воды, характер распределения зоопланктона в оз. Долгое совпадал с литературными данными [Вецлер, 2008; Сярки, Фомина, 2020]. Максимальная численность в столбе воды концентрировалась в верхних горизонтах, хотя и в меньшем количестве, чем летом (до 25 %). Фитопланктон не имел еще достаточного количественного развития; так, согласно предварительным данным, средняя численность фитопланктона составила 2,5 млн кл./л, а распределение по глубинам, в отличие от зоопланктона, было более равномерным и менялось в пределах 2,1–3,0 млн кл./л. В видовом отношении фитопланктон в это время года был представлен малопригодными для питания зоопланктона формами (доминировала *Cyclotella* sp.).

Также в вертикальном распределении важную роль играет световой режим [Ringelberg 1999; Williamson et al., 2020]. Концентрация зоопланктона в верхних слоях воды позволяет предположить, что в разных температурных условиях большинство животных стремятся занять наиболее освещенные зоны (положительный фототаксис). Распределение холодноводных видов во время весеннего перемешивания остается сходным с летним, но по разным причинам. Известно, что коловратка *K. longispina* может иметь максимум в металимнионе и гипolimнионе. Уход этого вида на большую глубину провоцируется одновременным воздействием солнечного света и беспозвоночных хищников, при этом популяция может «запираться» в узком диапазоне глубин [Boeing et al., 2004]. Распределение лимнокалянуса служит примером избегания хищников размещением на больших глубинах крупных и более подверженных выеданию рыбами взрослых особей и меньшей глубине расположения младших стадий развития [Суцень и др., 1986].

Заключение

Сравнение зоопланктонного сообщества озера Долгое в периоды летней стратификации и весенней гомотермии показало, что при сходном общем числе видов таксономическая структура, количественное развитие и вертикальное распределение претерпевают принципиальные изменения. Летом доминируют теплолюбивые ракообразные, тогда как весной основу численности формируют холодноводные коловратки и реликтовый *Limnocalanus macrurus*. Общая численность и биомасса зоопланктона весной оказываются намного ниже летних значений, что связано с ограничением кормовой базы и жизненным циклом вида. Несмотря на полное перемешивание водной массы и отсутствие температурного барьера, максимальная плотность зоопланктона сохраняется в верхних слоях воды, хотя и в меньшей степени, чем летом. Это указывает на то, что даже в условиях гомотермии распределение организмов не становится равномерным, а контролируется комплексом факторов, среди которых важную роль, вероятно, играют пищевые ресурсы и световой режим.

Полученные результаты согласуются с данными по другим димиктическим озерам. Таким образом, обнаруженные в озере Долгое закономерности отражают общие принципы организации пелагических сообществ в стратифицированных водоемах умеренной зоны в период летней стратификации и весенней гомотермии.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые для равнинного озера Беларуси детально охарактеризовано вертикальное распределение зоопланктона весной при одинаковой температуре в столбе воды. Впервые показано различие в вертикальном распределении разных возрастных стадий *Limnocalanus macrurus* в период открытой воды и при постоянстве температуры: молодые стадии концентрируются в поверхностных слоях, тогда как взрослые особи сохраняют приуроченность к придонным горизонтам. Эти данные дополняют представления об экологии этого редкого реликтового вида, находящегося на южной границе ареала и занесенного в Красную книгу Республики Беларусь.

С теоретической точки зрения работа уточняет механизмы формирования вертикальной структуры зоопланктона при гомотермии. Полученные фактические материалы по численности и вертикальному распределению отдельных видов дополняют сведения об их экологии и биологии, уточняют биотопическую

приуроченность и пространственную нишу. Практическая значимость связана с совершенствованием методов экологического мониторинга: показано, что пробы, отобранные только из поверхностных слоев или тотальным обловом, не отражают реального распределения зоопланктона в разные сезоны, поэтому при планировании мониторинговых исследований необходимо учитывать вертикальную структуру и применять послойный отбор проб. Кроме того, данные о приуроченности *Limnocalanus macrurus* к придонным слоям важны для организации охраны этого вида в гидрологическом заказнике «Долгое».

Исследования влияния весеннего термобара на структуру зоопланктона были проведены только в теплоинертной зоне озера; в дальнейшем при планировании таких работ необходимо обследовать и теплоактивную зону. Перспективы дальнейших исследований должны включать изучение вертикального распределения зоопланктона в период осенней гомотермии, синхронный анализ распределения фитопланктона и зоопланктона, сравнительный анализ с другими мезотрофными димиктическими озерами Беларуси (Волос, Ричи, Сита).

Литература

- Авинский В. А., Капустина Л. Л., Латинская Г. И., Протопопова Е. В. Планктонные сообщества Ладожского озера в термобарических условиях // Ладожское озеро: мониторинг, исследования современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими крупными озерами. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. С. 162–168.
- Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разного трофического типа. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
- Вежновец В. В. Биология реликтового рачка *Limnocalanus grimaldii* var. *macrurus* (Sars) и его продукционно-энергетическая характеристика: Дис. ... канд. биол. наук. Минск, 1984. 206 с.
- Вежновец В. В. Современное состояние популяций реликтовой копеподы *Limnocalanus macrurus* G.O. Sars, 1863 в озерах Беларуси // Актуальные проблемы изучения ракообразных: Сб. тезисов науч.-практ. конференции (Борок, 23–25 мая 2022 г.). Севастополь: ИПТС, 2022. С. 14.
- Вежновец В. В., Журавлев М. Д. Вертикальная структура зоопланктона в стратифицированных озерах Беларуси с разной степенью трофии // Биология внутренних вод. 2022. № 6. С. 725–733. doi: 10.31857/S0320965222060195
- Вежновец В. В., Журавлев М. Д. Вертикальная структура зоопланктона в стратифицированных равнинных и горных озерах // Биология внутренних

вод. 2026. Т. 19, № 1. С. 97–108. doi: 10.7868/S3034522726010081

Вещлер Н. М. Сезонные изменения вертикального распределения зоопланктонных организмов в озере Дальнее (Камчатка) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2008. Вып. 4. С. 208–209.

Власов Б. П., Якушко О. Ф., Гигевич Г. С., Раческий А. Н., Логинова Е. В. Озера Беларуси: Справочник. Минск: БГУ, 2004. 284 с.

Добрынин А. Э. Взаимосвязь трофического фактора и вертикального распределения зоопланктона двух озер Вологодской области // Трофические связи в водных сообществах и экосистемах: Матлы междунар. конф. (Борок, 28–31 октября 2003 г.) / РАН, ИБВВ им. И. Д. Папанина, Зоол. ин-т, Всерос. гидробиол. о-во. Борок, 2003. С. 32.

Журавлев М. Д. Зоопланктон озера Долгое (Беларусь) и его вертикальное распределение // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси. 2023. № 39. С. 357–368.

Журавлев М. Д., Вежновец В. В. Вертикальная структура летнего пелагического зоопланктона озера Долгое // Актуальные проблемы экологии: Сб. науч. ст. / М-во образования Респ. Беларусь, Гродн. гос. ун-т им. Янки Купалы, Гродн. обл. ком. природных ресурсов и охраны окружающей среды; редкол.: О. В. Янчуревич (гл. ред.), И. Б. Заводник, Е. И. Гляковская. Гродно: ГрГУ, 2025. С. 119–120.

Карпещук Е. В. Суточная динамика вертикального распределения зоопланктона в гипертрофном озере в период летней термической стратификации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2018. № 8. С. 24–34.

Кипрушина К. Н. Сезонная динамика вертикального распределения зоопланктона открытой части Южного Байкала (район Больших Котов) // Известия Иркутского гос. университета. Сер. Биология. Экология. 2009. Т. 2, № 1. С. 39–44.

Красная книга Республики Беларусь. Животные: редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / Редкол.: С. М. Масляк (предс.) [и др.]; редсовет: А. Н. Карлюкевич (гл. ред.) [и др.]. 5-е изд. Минск, 2025. С. 401–403.

Крючкова Н. М. Структура сообществ зоопланктона в водоемах разного типа // Труды ЗИН АН СССР. 1987. Т. 165. С. 184–198.

Кутикова Л. А. Коловратки фауны СССР. Л.: Наука, 1970. 744 с.

Монченко В. И. Челюстноротые циклопообразные. Циклопы (Cyclopidae) // Фауна Украины. Киев: Наукова думка, 1974. Т. 27, вып. 3. 452 с. (На укр.)

Неверова-Дзиопак Е., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолыхина. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 474 с.

Паспортизация озер Белоруссии: отчет о НИР (ч. 1) / БГУ; рук. О. Ф. Якушко. Минск, 1977. 138 с. ХД-ЛОЗ-671717.

Речкалов В. В., Голубок О. В. Соотношение численности зоопланктеров основных таксономических групп в водной толще термически стратифицированных озер различной трофности // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. № 10. С. 79–84.

Салазкин А. А., Иванова М. Б., Лаврентьева В. А. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Под ред. Г. Г. Винберга. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 34 с.

Суховило Н. Ю., Цыденов Б. О., Власова Д. Б., Князев И. С., Трунов Н. С. Вертикальное и горизонтальное распределение температур воды в период весеннего термобара в озере Долгое (Беларусь) по данным измерений и математического моделирования // Вестник ВГУ. Сер. География. Геоэкология. 2025. № 3. С. 111–120. doi: 10.17308/geo/1609-0683/2025/3/111-120

Суцень Л. М., Семенченко В. П., Вежновец В. В. Биология и продукция ледниковых реликтовых ракообразных. М.: Наука и техника, 1986. 160 с.

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Современное состояние зоопланктона озера Мунозеро (Республика Карелия) // Трансформация экосистем. 2020. № 3(1). С. 71–78. doi: 10.23859/estr-190419

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Зоопланктон Онежского озера, биоразнообразие и продуктивность // Биоразнообразие наземных и водных животных. Зооресурсы: III Всерос. науч. Интернет-конференция с междунар. участием (Казань, 24 февраля 2015 г.). Казань, 2015. 81 с.

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Жизненный цикл рачка *Limnocalanus macrurus* Sars 1863 (Copepoda, Calaniformes, Centropagidae) в Онежском озере // Зоологический журнал. 2022. Т. 101, № 1. С. 3–13. doi: 10.31857/S0044513421110064

Boeing W., Leech D., Williamson C., Cooke S., Torres L. Damaging UV radiation and invertebrate predation: conflicting selective pressures for zooplankton vertical distribution in the water column of low DOC lakes // Oecologia. 2004. Vol. 138. P. 603–612. doi: 10.1007/s00442-003-1468-0

Chalkia E., Zacharias I., Thomatou A., Kehayias G. Zooplankton dynamics in a gypsum karst lake and interrelation with the abiotic environment // Biologia. 2012. Vol. 67, no. 1. P. 151–163. doi: 10.2478/s11756-011-0147-6

Declerck S. A. J., de Senerpont Domis L. N. Contribution of freshwater metazooplankton to aquatic ecosystem services: an overview // Hydrobiologia. 2023. Vol. 850. P. 2795–2810. doi: 10.1007/s10750-022-05001-9

Dimante-Deimantovica I., Skute A., Skute R. Vertical variability of pelagic zooplankton fauna in deep Latvian lakes, with some notes on changes in ecological conditions // Estonian J. Ecol. 2012. Vol. 61, no. 4. P. 247–264. doi: 10.3176/eco.2012.4.02

Doulka E., Kehayias G. Seasonal vertical distribution and diel migration of zooplankton in a temperate stratified lake // Biologia. 2011. Vol. 66, no. 2. P. 308–319. doi: 10.2478/s11756-011-0023-4

Karpowicz M., Kuczyńska-Kippen N., Ślugoński Ł., Czerniawski R., Bogacka-Kapusta E., Ejsmont-Karabin J. Zooplankton as indicators of lake trophic status: novel universal metrics from 224 temperate lakes // *Ecol. Indic.* 2025. Vol. 179. P. 1–11. doi: 10.1016/j.ecolind.2025.114236

Likhoshway Ye. V., Kuzmina A. Ye., Potyemkina T. G., Potyemkin V. I., Shimaraev M. N. Distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal // *J. Great Lakes Res.* 1995. Vol. 22. P. 5–14.

Melnik N. G., Bondarenko N. A., Belykh O. I., Bli-nov 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(S). P. 69–76. doi: 10.1007/s10750-006-0331-9

Ringelberg J. The photobehaviour of *Daphnia* spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplankton // *Biol. Rev.* 1999. Vol. 74. P. 397–423. doi: 10.1111/j.1469-185X.1999.tb00036.x

Stamou G., Mazaris A. D., Moustaka-Gouni M., Spoljar M., Ternjej I., Drážina T., Dorak Z., Michaloudi E. Introducing a zooplanktonic index for assessing water quality of natural lakes in the Mediterranean region // *Ecol. Inform.* 2022. Vol. 69. Art. 101616. doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101616.

Williamson C. E., Overholt E. P., Pilla R. M., Wilkins K. W. Habitat-mediated responses of zooplankton to decreasing light in two temperate lakes undergoing long-term browning // *Front. Environ. Sci.* 2020. Vol. 8. Art. 73. doi: 10.3389/fenvs.2020.00073

Zadereev Y. S., Tolomeyev A. P. The vertical distribution of zooplankton in brackish meromictic lake with deep-water chlorophyll maximum // *Hydrobiologia.* 2007. Vol. 576. P. 69–82. doi: 10.1007/s10750-006-0294-x

References

Alekseev V. R., Tsalolikhin S. Ya. (eds.). A guide to zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Vol. 1. Zooplankton. Moscow: KMK; 2010. 474 p. (In Russ.)

Andronikova I. N. Structural and functional organization of zooplankton in lake ecosystems of different trophic types. St. Petersburg: Nauka; 1996. 189 p. (In Russ.)

Avinskii V. A., Kapustina L. L., Latinskaya G. I., Protopopova E. V. Plankton communities of Lake Ladoga under thermobaric conditions. *Ladozhskoe ozero: monitoring, issledovaniya sovremennogo sostoyaniya i problemy upravleniya Ladozhskim ozerom i drugimi krupnymi ozerami = Lake Ladoga: monitoring, research into the current state, and management issues of Lake Ladoga and other large lakes.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. P. 162–168. (In Russ.)

Boeing W., Leech D., Williamson C., Cooke S., Torres L. Damaging UV radiation and invertebrate predation: conflicting selective pressures for zooplankton vertical distribution in the water column of low DOC

lakes. *Oecologia.* 2004;138:603–612. doi: 10.1007/s00442-003-1468-0

Certification of lakes in Belarus: research report (part 1). BGU; Supervised by O. F. Yakushko. Minsk; 1977. 138 p. KhD-LOZ-671717. (In Russ.)

Chalkia E., Zacharias I., Thomatou A., Kehayias G. Zooplankton dynamics in a gypsum karst lake and interrelation with the abiotic environment. *Biologia.* 2012;67(1):151–163. doi: 10.2478/s11756-011-0147-6

Declerck S. A. J., de Senerpont Domis L. N. Contribution of freshwater metazooplankton to aquatic ecosystem services: an overview. *Hydrobiologia.* 2023;850:2795–2810. doi: 10.1007/s10750-022-05001-9

Dimante-Deimantovica I., Skute A., Skute R. Vertical variability of pelagic zooplankton fauna in deep Latvian lakes, with some notes on changes in ecological conditions. *Estonian J. Ecol.* 2012;61(4):247–264. doi: 10.3176/eco.2012.4.02

Dobrynin A. E. Relationship between the trophic factor and vertical distribution of zooplankton in two lakes in the Vologda Region. *Troficheskie svyazi v vodnykh soobshchestvakh i ehkosisistemakh: Mat-ly mezhdunar. konf. (Borok, 28–31 okt. 2003 g.) = Trophic relationships in aquatic communities and ecosystems: Proceed. int. conf. (Borok, Oct. 28–31, 2003).* Borok; 2003. P. 32. (In Russ.)

Doulka E., Kehayias G. Seasonal vertical distribution and diel migration of zooplankton in a temperate stratified lake. *Biologia.* 2011;66(2):308–319. doi: 10.2478/s11756-011-0023-4

Fomina Yu. Yu., Syarki M. T. Life cycle of the crustacean *Limnocalanus macrurus* Sars 1863 (Copepoda, Calaniformes, Centropagidae) in Lake Onega. *Zoologicheskii zhurnal = Zoological Journal.* 2022;101(1): 3–13. (In Russ.). doi: 10.31857/S0044513421110064

Fomina Yu. Yu., Syarki M. T. Zooplankton of Lake Onega, biodiversity and productivity. *Bioraznoobrazie nazemnykh i vodnykh zhivotnykh. Zooresursy: III Vseros. nauch. Internet-konf. s mezhdunar. uchastiem (Kazan', 24 fev. 2015 g.) = Biodiversity of terrestrial and aquatic animals. Zooresources: III All-Russ. scientific Internet conf. with int. part. (Kazan, Feb. 24, 2015).* Kazan'; 2015. 81 p. (In Russ.)

Karpeshchuk E. V. Diurnal dynamics of the vertical distribution of zooplankton in a hypertrophic lake during summer thermal stratification. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki = Modern Science: Current Problems of Theory and Practice.* 2018;8: 24–34. (In Russ.)

Karpowicz M., Kuczyńska-Kippen N., Ślugoński Ł., Czerniawski R., Bogacka-Kapusta E., Ejsmont-Karabin J. Zooplankton as indicators of lake trophic status: novel universal metrics from 224 temperate lakes. *Ecol. Indic.* 2025;179:1–11. doi: 10.1016/j.ecolind.2025.114236

Kiprushina K. N. Seasonal dynamics of vertical distribution of zooplankton in the open part of Southern Baikal (Bolshie Koty area). *Izvestiya Irkutskogo gos. universiteta. Ser. Biologiya. Ehkologiya = Bulletin of Irkutsk State University. Ser. Biology. Ecology.* 2009;2:39–44. (In Russ.)

- Kryuchkova N. M. Structure of zooplankton communities in different types of reservoirs. *Trudy ZIN AN SSSR = Proceedings of the Zoological Institute, Academy of Sciences of the USSR*. 1987;165:184–198. (In Russ.)
- Kutikova L. A. Rotifers of the fauna of the USSR. Leningrad: Nauka; 1970. 744 p. (In Russ.)
- Likhoshway Ye. V., Kuzmina A. Ye., Potyemkina T. G., Potyemkin V. I., Shimaraev M. N. Distribution of diatoms near a thermal bar in Lake Baikal. *J. Great Lakes Res.* 1995;22:5–14.
- Maslyak C. M. et al. (eds.). The Red Data Book of the Republic of Belarus. Animals: rare and endangered species of wild animals. 5th ed. Minsk; 2025. P. 401–403. (In Russ.)
- Melnik N. G., Bondarenko N. A., Belykh O. I., Bli-nov V. V., Ivanov V. G., Korovyakova I. V., Kostorno-va T. Ya., Lazarev M. I., Logacheva N. F., Pomazko-va G. I., Sherstyankin P. P., Sorokovikova L. M., Tolsti-kova L. I., Tereza E. P. Distribution of pelagic invertebrates near a thermal bar in Lake Baikal. *Hydrobiologia*. 2006;568(S):69–76. doi: 10.1007/s10750-006-0331-9
- Monchenko V. I. Cyclopiform Gnathostomata. Cyclopes (Cyclopidae). *Fauna Ukrainy = Fauna of Ukraine*. Kyiv: Naukova dumka; 1974. Vol. 27, iss. 3. 452 p. (In Ukrain.)
- Neverova-Dziopak E., Tsvetkova L. I. Assessment of the trophic state of surface waters. St. Petersburg: SPbGASU; 2020. 176 p. (In Russ.)
- Rechkalov V. V., Golubok O. V. The ratio of the abundance of zooplankters of the main taxonomic groups in the water column of thermally stratified lakes of varying trophicity. *Vestnik Orenburgskogo gos. universiteta = Bulletin of Orenburg State University*. 2013;10:79–84. (In Russ.)
- Salazkin A. A., Ivanova M. B., Lavrent'eva V. A. Methodological recommendations for collecting and processing materials in hydrobiological studies on freshwater reservoirs. Zooplankton and its products. Leningrad: GosNIORKh; 1984. 34 p. (In Russ.)
- Sukhovilo N. Yu., Tsydenov B. O., Vlasova D. B., Knyazev I. S., Trunov N. S. Vertical and horizontal distribution of water temperatures during the spring thermal bar in Lake Dolgoe (Belarus) based on measurements and mathematical modeling. *Vestnik VGU. Ser. Geografiya. Geoekologiya = VSU Bulletin. Ser. Geography. Geoecology*. 2025;3:111–120. (In Russ.). doi: 10.17308/geo/1609-0683/2025/3/111-120
- Sushchenya L. M., Semenchenko V. P., Vezhnovets V. V. Biology and production of glacial relict crustaceans. Moscow: Nauka i tekhnika; 1986. 160 p. (In Russ.)
- Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. Current state of zooplankton of Lake Munozero (Republic of Karelia). *Transformatsiya ehkositsem = Ecosystem Transformation*. 2020;3(1):71–78. (In Russ.). doi: 10.23859/estr-190419
- Ringelberg J. The photobehavior of *Daphnia* spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplankton. *Biol. Rev.* 1999;74:397–423. doi: 10.1111/j.1469-185X.1999.tb00036.x
- Stamou G., Mazaris A. D., Moustaka-Gouni M., Spoljar M., Ternjejl., Držina T., Dorak Z., Michaloudi E. Introducing a zooplanktonic index for assessing water quality of natural lakes in the Mediterranean region. *Ecol. Inform.* 2022;69:101616. doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101616
- Vetsler N. M. Seasonal changes in the vertical distribution of zooplankton organisms in Lake Dalneye (Kamchatka). *Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova = Readings in memory of Vladimir Yakovlevich Levanidov*. 2008;4:208–209. (In Russ.)
- Vezhnavets V. V. Biology of the relict crustacean *Limnocalanus grimaldii* var. *macrurus* (Sars) and its production-energy characteristics: PhD (CanD. of Biol.) thesis. Minsk; 1984. 206 p. (In Russ.)
- Vezhnovets V. V. Current state of populations of the relic copepod *Limnocalanus macrurus* G.O. Sars, 1863 in lakes of Belarus. *Aktual'nye problemy izucheniya rakoobraznykh: Sb. tezisov nauch.-prakt. konf. (Borok, 23–25 maya 2022 g.) = Current problems of crustacean study: Proceed. of the scientific and practical conf. (Borok, May 23–25, 2022)*. Sevastopol: IPTS; 2022. P. 14. (In Russ.)
- Vezhnovets V. V., Zhuravlev M. D. Vertical structure of zooplankton in stratified lakes of Belarus with different trophic degrees. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2022;6:725–733. (In Russ.). doi: 10.31857/S0320965222060195
- Vezhnovets V. V., Zhuravlev M. D. Vertical structure of zooplankton in stratified lowland and mountain lakes. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2026;19:97–108. (In Russ.). doi: 10.7868/S3034522726010081
- Vlasov B. P., Yakushko O. F., Gigevich G. S., Rachesky A. N., Loginova E. V. Lakes of Belarus: a handbook. Minsk: BGU; 2004. 284 p. (In Russ.)
- Williamson C. E., Overholt E. P., Pilla R. M., Wilkins K. W. Habitat-mediated responses of zooplankton to decreasing light in two temperate lakes undergoing long-term browning. *Front. Environ. Sci.* 2020;8:73. doi: 10.3389/fenvs.2020.00073
- Zadereev Y. S., Tolomeyev A. P. The vertical distribution of zooplankton in brackish meromictic lake with deep-water chlorophyll maximum. *Hydrobiologia*. 2007;576:69–82. doi: 10.1007/s10750-006-0294-x
- Zhuravlev M. D., Vezhnovets V. V. Vertical structure of summer pelagic zooplankton of Lake Dolgoe. *Aktual'nye problemy ehkologii: Sb. nauch. st. = Current problems of ecology: Proceed.* Grodno: GrGU; 2025. P. 119–120. (In Russ.)
- Zhuravlev M. D. Zooplankton of Lake Dolgoe (Belarus) and its vertical distribution. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi = Belarus Fish Industry Problems*. 2023;39:357–368. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 01.12.2025; принята к публикации / accepted: 12.07.2026.
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Вежновец Василий Васильевич

канд. биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник
лаборатории гидробиологии

e-mail: vezhn47@mail.ru

Журавлев Михаил Дмитриевич

младший научный сотрудник лаборатории
гидробиологии

e-mail: mishatelefon13@gmail.com

Власова Дарья Борисовна

младший научный сотрудник научно-
исследовательской лаборатории озероведения

e-mail: darriavlasova@gmail.com

Суховило Нина Юрьевна

канд. геогр. наук, заведующая научно-
исследовательской лабораторией озероведения

e-mail: SukhoviloNY@bsu.by

Цыденов Баир Олегович

канд. физ.-мат. наук, заведующий научно-
исследовательской лабораторией вычислительной
геофизики

e-mail: tsydenov@math.tsu.ru

CONTRIBUTORS:

Vezhnavets, Vasili

Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor,
Leading Researcher

Zhurauliou, Mikhail

Junior Researcher

Vlasova, Dar'ya

Junior Researcher

Sukhovilo, Nina

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

Tsydenov, Bair

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory

УДК 574.583

СОСТАВ, БИОМАССА И ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА МЕРОМИКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА УЗКОЕ (КАРЕЛЬСКИЙ ПЕРЕШЕЕК) В РАЗНЫЕ СЕЗОНЫ ГОДА

И. С. Трифонова, Д. П. Стручкина*

Институт озераведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург,
Россия, 196105), *daryastruchkina@yandex.ru

В мае, июле и октябре 2024 и 2025 гг. проведены исследования фитопланктона в центральной глубоководной части озера Узкое, расположенного в сельговом ландшафте Северо-Западного Приладожья. Озеро характеризуется устойчивой термической и кислородной стратификацией с постоянной температурой около 4 °С и бескислородной зоной в монимолимии. В видовом составе фитопланктона обнаружено 80 таксонов водорослей рангом ниже рода. Среди них по числу таксонов наиболее разнообразны зеленые (хлорофитовые), диатомовые и эвгленовые. 45 таксонов встречены в количественных пробах. Наибольшей численности достигали хлорококковые из зеленых, десмидиевая *Closterium acutum* из харовых, флагелляты из криптофитовых, хризифитовых, эвгленовых и динофитовых, способные к вертикальной миграции в водной толще в условиях строгой стратификации. Только весной максимальное развитие водорослей наблюдалось в поверхностном слое. Летом и осенью максимум биомассы отмечался над слоем термоклина на глубине 4–6 м. В монимолимии фитопланктон практически отсутствовал. В целом за два года наблюдений в оз. Узком средневзвешенная биомасса в трофогенном слое (0–6 м) изменялась по сезонам от 0,7 до 1,8 г/м³. Причем в 2024 году наибольшие величины отмечались летом, а в 2025 году – весной, что определялось разными погодными условиями. Ориентировочные средние за сезон величины за два года были близки – около 1 г/м³, что позволяет по уровню биомассы фитопланктона охарактеризовать оз. Узкое как мезотрофное.

Ключевые слова: стратифицированные озера; фитопланктон; флагелляты; вертикальное распределение; биомасса; термоклин

Для цитирования: Трифонова И. С., Стручкина Д. П. Состав, биомасса и вертикальное распределение фитопланктона меромиктического озера Узкое (Карельский перешеек) в разные сезоны года // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 103–110. doi: 10.17076/lim2318

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственной темы ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН № FFZF-2024-0001.

I. S. Trifonova, D. P. Struchkina*. PHYTOPLANKTON COMPOSITION, BIOMASS AND VERTICAL DISTRIBUTION IN THE MEROMICTIC LAKE UZKOYE (KARELIAN ISTHMUS) ACROSS SEASONS

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *daryastruchkina@yandex.ru

In May, July and October 2024 and 2025 phytoplankton studies were conducted in Lake Uzkoeye, located in the selga-ridge landscape of the north-western Ladoga region. The lake is characterized by stable thermal and oxygen stratification, with the monimolimnion featuring temperature constantly at around 4 °C and an anoxic zone. The phytoplankton species composition comprises 80 algal taxa ranking below genus. Chlorophytes, diatoms, and euglenophytes were the most diverse groups in terms of the number of taxa. 45 taxa were recorded in quantitative samples. The highest abundances were exhibited by chlorococcales in chlorophytes, *Closterium acutum* in charophytes, and flagellates in cryptophytes, chrysophytes, euglenophytes, and dinoflagellates, capable of vertical migration through a strongly stratified water column. It was only in the spring that peak algal development was observed in the surface layer. In the summer and fall, the biomass was the greatest above the thermocline, at 4–6 m depths. The monimolimnion was nearly free of phytoplankton. Over the two-year period of observations in Lake Uzkoeye, the weighted-average phytoplankton biomass in the trophogenic layer (0–6 m) ranged seasonally from 0.7 to 1.8 g/m³. In 2024, the highest values were recorded in summer, whereas in 2025 they occurred in spring, which was determined by different weather conditions. The approximate seasonal averages of phytoplankton biomass were similar in the two years, about 1 g/m³, suggesting Lake Uzkoeye can be classified as mesotrophic.

Keywords: stratified lake; phytoplankton; flagellates; vertical distribution; biomass; thermocline

For citation: Trifonova I. S., Struchkina D. P. Phytoplankton composition, biomass and vertical distribution in the meromictic Lake Uzkoeye (Karelian Isthmus) across seasons. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 103–110. doi: 10.17076/lim2318

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Institute of Limnology RAS – SPC RAS (FFZF-2024-0001).

Введение

Фитопланктон озер Приладожья до последнего времени оставался менее изученным по сравнению с озерами других ландшафтных районов Карельского перешейка [Трифонова и др., 2017]. В 2024 и 2025 гг. проведены комплексные химико-биологические исследования (в том числе фитопланктона) на ряде озер Северо-Западного Приладожья. Среди них особый интерес представляет сравнительно глубоководное оз. Узкое, строго стратифицированное, предположительно меромиктическое [Дудаков и др., 2025]. Такие озера достаточно редки, представляют значительный интерес и подлежат охране [Eloranta, 1986; Краснова, 2021]. Изучение фитопланктона стратифицированных озер важно для понимания экологии отдельных видов и групп планктонных водорослей и механизмов их адаптации к условиям среды [Reynolds, 1980, 2006; Трифонова, 1990 и др.]. Условия и частота вертикального перемешивания водной массы и степень устойчивости стратификации

наряду с доступностью биогенных элементов во многом определяют состав и продуктивность водных сообществ и трофический тип озер [Reynolds, 2006 и др.]. Исследования выполнялись в течение двух лет, один раз в сезон – в мае, июле и октябре, что позволило проанализировать таксономический состав планктонных водорослей, их вертикальное распределение, уровень биомассы в разные сезоны.

Объект исследований

Озеро Узкое расположено в 12 км севернее г. Приозерска в сельговом ландшафте Северо-Западного Приладожья, относящегося к Балтийскому кристаллическому щиту [Исаченко, 1985], и имеет сток непосредственно в Ладожское озеро. Водоем узкой конфигурации, вытянут с северо-запада на юго-восток, как и большинство озер Карельского перешейка, что позволяет предполагать его ледниковое происхождение. Длина озера 1,6 км, ширина до 0,5 км, средняя глубина 6–7 м, максимальная

в центральной части 16 м. Именно в центральной глубоководной части, которая занимает чуть более 10 % площади акватории, отмечена устойчивая термическая и химическая стратификация в течение всего периода исследований [Дудаков и др., 2025]. Термоклин располагался на глубине 6–8 м. Глубже 9 м, в мимолимнионе, температура воды постоянно была около 4 °С, кислород полностью отсутствовал, существовала устойчивая анаэробная зона. В весенне-летний период термоклин располагался в слое 2–4 м, к осени отмечено его заглубление до 6–8 м. По данным Н. В. Игнатьевой, значения pH изменялись в интервале 6,3–7,3, т. е. от слабокислых в мимолимнионе до нейтральных в миксолимнионе, цветность воды поверхностных слоев озера не превышала 45 град., в анаэробных условиях значения цветности резко возрастали, также резко возрастала электропроводность [Дудаков и др., 2025]. Прозрачность изменялась от 1,75 до 3 м. Наименьшие величины отмечались весной, наибольшей прозрачность была в июле.

Материалы и методы

Исследования фитопланктона проводили в мае, июле и октябре 2024 и 2025 гг. в центральной глубоководной части озера. Качественные пробы отбирали планктонной сетью из газа № 77, количественные – батометром Рутнера по горизонтам, фиксировали раствором Люголя, концентрировали осадочным способом и просчитывали в камере Навотта объемом 0,05 мл, биомассу рассчитывали счетно-объемным способом [Гусева, 1959]. Идентификацию водорослей проводили в основном по «Определителю пресноводных водорослей СССР» [1951–1982, т. 1–11] с учетом современных таксономических разработок. Названия и таксономическая принадлежность водорослей были уточнены с использованием международного электронного ресурса AlgaeBase [Guiry, Guiry, 2026].

Результаты и обсуждение

Таксономический состав фитопланктона оз. Узкое достаточно разнообразен. Всего за период наблюдений в планктоне озера обнаружено 80 таксонов водорослей рангом ниже рода, относящихся к 8 отделам: Chlorophyta – 25, Bacillariophyta – 14, Cyanobacteriophyta – 6, Euglenophyta – 9, Heterokontophyta – 12, Cryptista – 8, Dinoflagellata – 5, Charophyta – 1. Наибольшее число таксонов относится к хлорофитовым и диатомовым, однако многие из них

отмечены единично, в том числе большинство бентосных диатомей. Только 45 таксонов вносили вклад в общую биомассу фитопланктона (табл. 1)

Наибольшей численности достигали зеленые водоросли из хлорококковых *Botryococcus braunii*, *Crucigenia tetrapedia*, *Kirchneriella obesa*, *Quadrigula pfitzeri*, *Tetrastrum triangulare*; десмидиевая *Closterium acutum* из харовых; эвгленовые, преимущественно многочисленные виды рода *Trachelomonas*, хризифитовые *Chrysococcus* sp., *Dinobryon divergens*, *Mallomonas caudata* и криптофитовые из родов *Cryptomonas*, *Komma* и *Rhodomonas*. Из диатомовых наибольшей численности достигали *Aulacoseira tenella*, *Asterionella formosa* и *Cyclotella comta*, численность которых и роль в биомассе были выше в 2025 г.

Биомасса фитопланктона и ее изменения по сезонам, а также вертикальное распределение водорослей за два года исследований значительно отличались (рис. 1 и 2).

В мае 2024 г. величины биомассы изменялись от 0,04 до 1,05 мг/л. Наибольшими они были у поверхности и постепенно снижались с глубиной (рис. 1). В весеннем планктоне доминировали хлорофитовые и криптофитовые водоросли, составляя до 63 и 85 % общей биомассы соответственно. Доминантом из хлорофитовых была *Botryococcus braunii*, из криптофитовых – *Cryptomonas erosa*, их наибольшее развитие отмечалось в слое 0–2 м. Криptomonеды *Cryptomonas erosa*, *C. curvata*, *C. ovata* и мелкоклеточная *Komma caudata* достаточно равномерно распределялись до глубины 8 м. Субдоминантами были эвгленовые водоросли (до 13 %), среди которых преобладали *Trachelomonas volvocina* и *Euglena hemychromata*. Ниже 8 м фитопланктон практически отсутствовал.

В июле биомасса фитопланктона на разных горизонтах составляла 0,06–2,52 мг/л. Если в мае наибольшая биомасса фитопланктона отмечалась в поверхностных горизонтах, то в июле – на глубине 4 м. В поверхностном слое и на глубине 2 м доминировали хризифитовые водоросли, преимущественно виды рода *Chrysococcus*, составляя до 51 % от общей биомассы. Субдоминантами были эвгленовые (до 21 %) и криптомонеды (до 11 %), виды из родов *Trachelomonas* и *Cryptomonas*. Кроме них здесь в незначительном количестве отмечались диатомовые, в основном мелкоклеточная *Aulacoseira tenella*, *Cyclotella comta* и редко *Asterionella formosa*. Максимальная биомасса установлена на глубине 4 м, где доминировала десмидиевая *Closterium acutum* из харовых (56 %).

Таблица 1. Максимальная численность водорослей фитопланктона оз. Узкое в 2024 и 2025 гг. (тыс. кл./л)
Table 1. Maximum number of phytoplankton algae in Lake Uzkoje in 2024 and 2025 (thousand cells/l)

Вид / Species	2024	2025
Cyanobacteriophyta		
<i>Planktothrix agardhii</i> (Gom.) Anagnostidis & Kom, 1988	-	600
<i>Planktolyngbya limnetica</i> (Lemm.) Kom.-Legn. et Cronb., 1992	28	-
<i>Spirulina major</i> Kütz, 1892	20	-
Heterokontophyta		
<i>Chrysococcus rufescens</i> Klebs, 1892	24	360
<i>Chrysococcus</i> sp.	1360	200
<i>Dinobryon bavaricum</i> Imhof, 1890	-	20
<i>D. divergens</i> Imhof, 1887	25	260
<i>Kephyrion densatum</i> (Gerlinde Schmid) Bourrelly, 1957	24	80
<i>Mallomonas caudata</i> Iwanoff (Ivan.), 1899	16	220
<i>Stenokalyx cylindricus</i> Gerlinde Schmid, 1934	25	160
<i>S. laticollis</i> Conrad, 1939	-	20
Bacillariophyta		
<i>Aulacoseira tenella</i> (Nyg.) Sim., 1979	152	620
<i>Asterionella formosa</i> Hass., 1850	64	130
<i>Cyclotella comta</i> var. <i>radiosa</i> Grunow, 1882	600	920
<i>Nitzschia holsatica</i> Hust., 1930	60	-
<i>Synedra ulna</i> (Nitzsch) Her., 1832	120	60
<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz., 1844	-	16
<i>T. flocculosa</i> (Roth) Kütz., 1844	-	80
Dinoflagellata		
<i>Ceratium hirundinella</i> (O. F. Müll.) Dujardin, 1841	20	12
<i>Peridinium aciculiferum</i> Lemm., 1900	45	20
<i>P. cinctum</i> (O. F. Müll.) Ehr., 1832	20	60
Cryptista		
<i>Komma caudata</i> (L. Geitler) D. R. A. Hill, 1991	540	1200
<i>Cryptomonas curvata</i> Ehr., 1832	12	-
<i>C. erosa</i> Ehr., 1832	80	130
<i>C. ovata</i> Ehr., 1832	160	216
<i>Rhodomonas lacustris</i> Pasch. et Ruttner	320	680
Chlorophyta		
<i>Ankyra judayi</i> (G. M. Smith) Fott, 1957	4	8
<i>Botryococcus braunii</i> Kütz., 1849	20	320
<i>Coenococcus planctonicus</i> Korsh., 1953	40	5
<i>Crucigenia tetrapedia</i> (Kirchn.) Lemmerman, 1902	400	128
<i>Kirchneriella obesa</i> (West) West et G. S. West, 1894	220	20
<i>Monoraphidium contortum</i> (Thur.) et Kom.-Legn., 1969	120	60
<i>Oocystis submarina</i> Lagerheim, 1886	12	-
<i>Quadrigula pfitzeri</i> (Schröder) G. M. Smith, 1918	40	340
<i>Scenedesmus arcuatus</i> Lemm., 1898	-	192
<i>Tetrastrum triangulare</i> (Chod.) Kom., 1974	5	560
<i>Tetraëdron minimum</i> (A. Br.) Hansg., 1889	5	5
Charophyta		
<i>Closterium acutum</i> Bréb, 1848	2400	260
Euglenophyta		
<i>Trachelomonas globularis</i> (Aver. 1910) Lemm., 1910	16	40
<i>T. hispida</i> (Perty, 1849) Stein, 1878	20	20
<i>T. planctonica</i> Svir., 1914	20	20
<i>T. superba</i> Svir., 1914	4	4
<i>T. volvocina</i> Ehrenberg, 1834	56	60
<i>Euglena acus</i> (O. F. Müll., 1786) Her., 1830	12	-
<i>E. hemichromata</i> Skuja, 1948	4	-

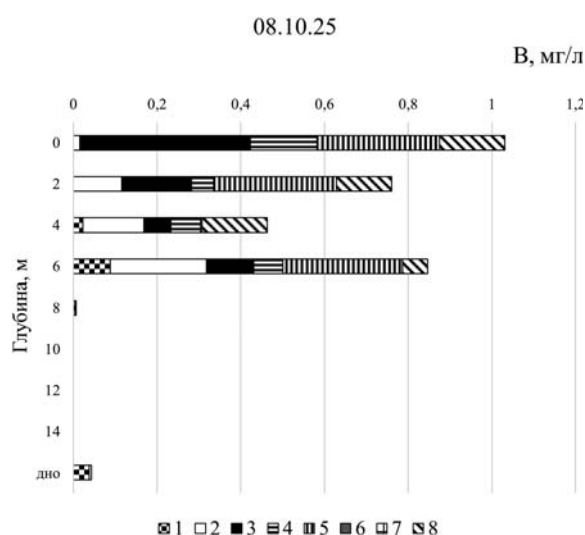
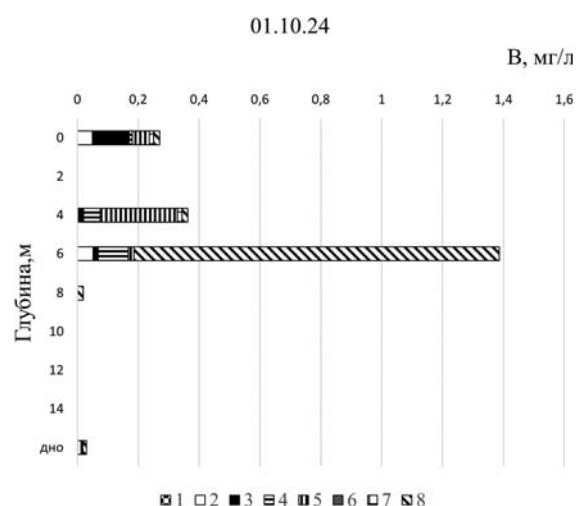
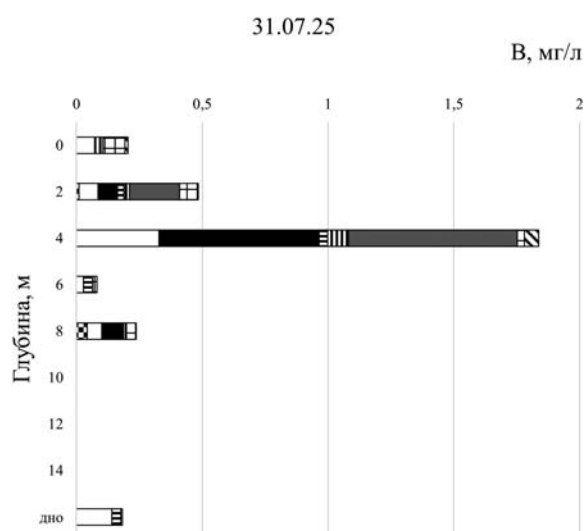
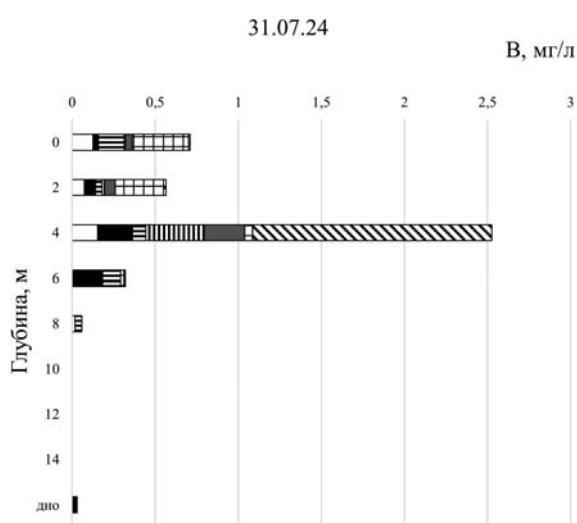
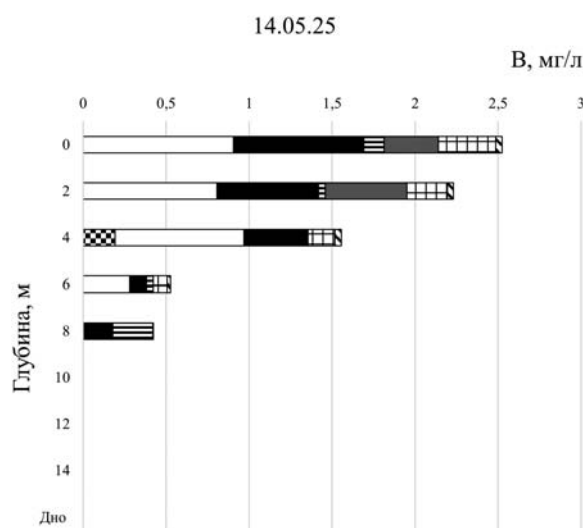
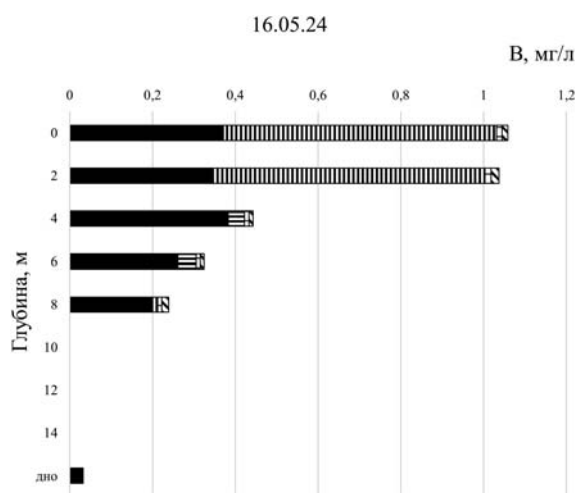


Рис. 1. Вертикальное распределение биомассы фитопланктона в оз. Узкое в 2024 г.

Fig. 1. Vertical distribution of phytoplankton biomass in Lake Uzkoje in 2024

Здесь и на рис. 2 / Here and in Fig. 2: 1 – Cyanobacteriophyta, 2 – Bacillariophyta, 3 – Cryptista, 4 – Euglenophyta, 5 – Chlorophyta, 6 – Dinoflagellata, 7 – Heterokontophyta, 8 – Charophyta

Рис. 2. Вертикальное распределение биомассы фитопланктона в оз. Узкое в 2025 г.

Fig. 2. Vertical distribution of phytoplankton biomass in Lake Uzkoje in 2025

Субдоминантом была хлорофитовая *Botryococcus braunii* (13 %). Здесь же над слоем термоклина концентрировались динофитовые *Peridinium cinctum*, *P. aciculiferum*, *Ceratium hirundinella* и хризифитовая *Mallomonas caudata*. Уже на 6 м биомасса резко снижалась, в планктоне оставались криптомонады (55 %) и эвгленовые (34 %).

Осенью 2024 г. в оз. Узком биомасса фитопланктона снизилась, особенно в поверхностных слоях. Она изменялась от 0,27 до 1,39 мг/л. В слое 0–4 м, как и весной, доминировали криптомонады и хлорофитовые водоросли. Доля криптонада достигала 44 % на 0 м, а хлорофитовых – 69 % на 4 м. Субдоминантами были диатомовые *Asterionella formosa* и виды рода *Cyclotella* (до 18 %). Максимальные величины отмечались на глубине 6 м за счет массового развития десмидиевой водоросли *Closterium acutum*, ее доля составляла 86 %. Субдоминантом здесь были эвгленовые (7 %), преимущественно виды рода *Trachelomonas*.

Весной 2025 г. биомасса фитопланктона была выше, чем весной 2024 г., и изменялась от 0,42 до 2,65 мг/л (рис. 2). Максимальная величина наблюдалась в поверхностном слое и постепенно снижалась с глубиной. В слое 0–6 м доминировали диатомовые и криптофитовые водоросли. Доля диатомовых водорослей составляла от 35 до 53 %, среди них преобладали *Cyclotella comta* и *Aulacoseira tenella*. Среди криптонада, которые составляли от 19 до 42 %, доминировали *Cryptomonas erosa*, *C. reflexa*, *C. ovata* и мелкоклочные *Rhodomonas lacustris* и *Komma caudata*. Субдоминантами были динофитовые (до 22 %) и хризифитовые (до 15 %), прежде всего *Peridinium aciculiferum*, виды рода *Chrysococcus* и *Mallomonas caudata*, наибольшее развитие которых отмечалось в поверхностном слое. На глубине 4 м отмечалось заметное развитие *Planktolyngbya limnetica* (12 %) из цианобактерий. На глубине 8 м преобладали эвгленовые (57 %), в основном виды рода *Trachelomonas*.

Летом 2025 г. биомасса фитопланктона изменялась от 0,08 до 1,83 мг/л и была ниже, чем весной. На поверхности доминировали диатомовые и хризифитовые, составляя 35 и 43 % соответственно. На глубинах 2 и 4 м доминировали криптофитовые (до 34 %) и динофитовые водоросли (до 36 %), в основном *Peridinium cinctum* и *Ceratium hirundinella*. Субдоминантами были диатомовые (до 17 %) *Aulacoseira tenella*, *Asterionella formosa*, *Cyclotella comta*. Максимум биомассы отмечался на глубине 4 м над слоем термоклина. На глубине 6 м преобладали эвгленовые (43 %), диатомовые (34 %) и хризифитовые (22 %), преимущественно *Trachelomonas volvocina*, *Dinobryon divergens* и *Cyclotella comta*. На глубине 8 м до 20 % биомассы составляли цианобактерии *Planktothrix agardhii* и *Planktolyngbya limnetica*.

Осенью 2025 г. в оз. Узкое биомасса фитопланктона изменялась от 0,01 до 1,03 мг/л. Максимальные величины были у поверхности и над слоем термоклина (6 м). Доминанты по биомассе сменялись на разных глубинах. В слое 0–2 м преобладали криптомонады (до 39 %) *Rhodomonas lacustris*, *Komma caudata* и хлорофитовые водоросли (до 28 %), преимущественно *Chlamydomonas* sp. В слое 4 м биомассу определяли диатомовые *Cyclotella comta*, *Aulacoseira tenella* (31 %) и десмидиевая *Closterium acutum* (33 %). На глубине 6 м доминировали хлорофитовые, преимущественно *Chlamydomonas* sp. (33 %), и те же виды диатомовых (27 %), в число субдоминантов (10 %) входили цианобактерии *Planktothrix agardhii*, *Planktolyngbya limnetica*. В более глубоких слоях в небольшом количестве отмечалась *Spirulina major*.

В целом за два года наблюдений в оз. Узкое средневзвешенная биомасса в трофогенном слое (0–6 м) изменялась по сезонам от 0,7 до 1,8 г/м³. Причем в 2024 г. наибольшие величины отмечались летом, а в 2025 г. весной (табл. 2). Вероятно, это определялось разными погодными условиями: сроками таяния льда и начала вегетационного сезона. В 2025 году уже

Таблица 2. Средневзвешенные значения биомассы фитопланктона (В) в оз. Узкое в трофогенном слое в 2024 и 2025 гг.

Table 2. Weighted average biomass (B) of phytoplankton in the trophogenic layer of Lake Uzkoje in 2024 and 2025

Дата / Date	14.05.24	31.07.24	01.10.24
В, г/м³ g/m³	0,70	1,35	0,86
Дата/Date	14.05.25	31.07.25	08.10.25
В, г/м³ g/m³	1,77	0,85	0,72

в начале апреля установились положительные температуры, которые держались на протяжении всего месяца, тогда как в 2024 г. постоянные положительные температуры установились только в конце апреля; июль 2025 г., напротив, был более холодным и ветреным [Архив...].

Заключение

В стратифицированном оз. Узкое ориентировочные средние за период исследования величины за два года были близки, около 1 г/м^3 , что позволяет по уровню биомассы фитопланктона охарактеризовать озеро как мезотрофное [Трифорова, 1990]. Только весной максимальное развитие водорослей наблюдалось в поверхностном слое. Летом и осенью максимум биомассы отмечался над слоем термоклина на глубине 4–6 м, в мониолимнионе фитопланктон практически отсутствовал. В оба года над слоем термоклина и непосредственно в нем концентрировались флагеллаты из криптофитовых, хризифитовых, эвгленовых и динофитовых водорослей и десмидиевая *Closterium acutum*, способные к вертикальной миграции в водной толще в условиях строгой стратификации. Кроме того, ниже термоклина в небольшом количестве встречены цианобактерии из родов *Planktothrix* и *Planktolyngbya*. Диатомовые, преобладающие по биомассе в большинстве озер Карельского перешейка [Трифорова, 1990], в оз. Узкое играли заметную роль только в 2025 г. в условиях большой ветровой активности.

Из известных континентальных пресноводных меромиктических озер [Краснова, 2021] наиболее сходны с оз. Узкое по составу и распределению фитопланктона озера Валаамского архипелага Игуменское и Черное [Воякина, 2007] и небольшие стратифицированные лесные озера Финляндии [Arvola, Rask, 1984; Eloranta, 1986]. Во всех этих водоемах по биомассе преобладали флагеллаты из криптофитовых, золотистых и динофитовых водорослей, в массе развивались рафидофитовые (*Gonyostomum semen*). Все эти водоросли, помимо способности к вертикальной миграции в оптимальные слои водной толщи, являются миксотрофными организмами и могут потреблять растворенное органическое вещество. Конкурентные преимущества этих организмов в условиях стратификации и дефицита биогенных элементов определяют особенности состава и вертикального распределения фитопланктона стратифицированных водоемов [Reynolds, 1980, 2006 и др.]. Важную роль играют и погодные условия разных лет, определяя степень перемешивания.

Авторы выражают благодарность к. г. н. Н. В. Игнатъевой за организацию исследований оз. Узкое и гидрохимические данные.

Литература

- Архив погоды в Приозерске // Gismeteo [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gismeteo.ru/weather-priozersk-3932/archive/> (дата обращения: 18.03.2026).
- Воякина Е. Ю. Фитопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2007. 23 с.
- Гусева К. А. К методике учета фитопланктона // Труды Института биологии водохранилищ. 1959. Т. 2, вып. 5. С. 44–51.
- Дудаков С. М., Игнатъева Н. В., Дудакова Д. С. Гидроакустические и гидрохимические характеристики меромиктического озера Узкое // LXXVIII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования: Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., 23–26 апреля 2025 г. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2025. С. 164–167.
- Исаченко А. Г. Ландшафты СССР. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1985. 320 с.
- Краснова Е. Д. Экология меромиктических озер России. 2. Континентальные водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 4. С. 451–460. doi: 10.31857/S032105962104009X
- Определитель пресноводных водорослей СССР / Отв. ред. М. М. Голлербах. М.: Советская наука; Л.: Наука, 1951–1983. Вып. 1–11.
- Трифорова И. С., Афанасьева А. Л., Русанов А. Г. Трофическое состояние озер разных ландшафтов Карельского перешейка в современных условиях // Вода: Химия и экология. 2017. № 7. С. 3–8.
- Трифорова И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, 1990. 182 с.
- Arvola L., Rask M. Relations between phytoplankton and environmental factors in a small, spring meromictic lake in southern Finland // Aqua Fennica. 1984. Vol. 14. P. 129–138.
- Eloranta P. Phytoplankton structure in different lake types in central Finland // Holarct Ecol. 1986. Vol. 9. P. 214–224. doi: 10.1111/j.1600-0587.1986.tb01210.x
- Findenegg J. Factors controlling primary productivity, especially with regard to water replenishment, stratification, and mixing // Primary productivity in aquatic environments: Proceedings of an I. B. P. PF Symposium, Pallanza, Italy, 1965 / Ed. Goldman C. R. Berkeley: University of California Press; 1966. P. 105–119.
- Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2026. URL: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=sourcedetails&id=37> (дата обращения: 15.03.2026).
- Reynolds C. S. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems // Holarctic Ecology. 1980. Vol. 3. P. 141–159. doi: 10.1111/j.1600-0587.1980.tb00721.x
- Reynolds C. S. The ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. 443 p. doi: 10.1017/CBO9780511542145

References

- Arvola L., Rask M. Relations between phytoplankton and environmental factors in a small, spring meromictic lake in southern Finland. *Aqua Fennica*. 1984;14:129–138.
- Dudakov S. M., Ignat'eva N. V., Dudakova D. S. Hydroacoustic and hydrochemical characteristics of meromictic Lake Uzkoie. *LXXVIII Gertsenovskie chteniya. Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya: Mat-ly Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 23–26 aprelya 2025 g. = LXXVIII Herzen Readings. Geography: development of science and education: Proceed. of the Int. scientific and practical conf., Apr. 23–26, 2025; St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg; 2025. P. 164–167. (In Russ.)
- Eloranta P. Phytoplankton structure in different lake types in central Finland. *Holarct Ecol.* 1986;9:214–224. doi: 10.1111/j.1600-0587.1986.tb01210.x
- Findenegg J. Factors controlling primary productivity, especially with regard to water replenishment, stratification, and mixing. *Primary productivity in aquatic environments: Proceedings of an I. B. P. PF Symposium, Pallanza, Italy, 1965*. Berkeley: University of California Press; 1966. P. 105–119.
- Gollerbach M. M. (ed.). A key to freshwater algae of the USSR. Moscow: Sovetskaya nauka; Leningrad: Nauka; 1951–1983. Vol. 1–11. (In Russ.)
- Guiry M. D., Guiry G. M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2026. URL: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=sourcedetails&id=37> (accessed: 15.03.2026).
- Guseva K. A. To the methodology of accounting for phytoplankton. *Trudy Instituta biologii vodokhranilishch = Proceed. of the Institute of Reservoir Biology*. 1959;2(5):44–51. (In Russ.)
- Isachenko A. G. *Landscapes of the USSR*. Leningrad: Leningrad. Univ.; 1985. 320 p. (In Russ.)
- Krasnova E. D. Ecology of meromictic lakes in Russia. 2. Continental water bodies. *Vodnye Resursy = Water Resources*. 2021;48(4):451–160. (In Russ.). doi: 10.31857/S032105962104009X
- Reynolds C. S. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems. *Holarct Ecol.* 1980; 3:141–159. doi: 10.1111/j.1600-0587.1980.tb00721.x
- Reynolds C. S. *The ecology of phytoplankton*. Cambridge: Cambridge Univ. Press; 2006. 443 p. doi: 10.1017/CBO9780511542145
- Trifonova I. S., Afanas'eva A. L., Rusanov A. G. Trophic state of lakes in different landscapes of the Karelian Isthmus under modern conditions. *Voda: Khimiya i ekhologiya = Water: Chemistry and Ecology*. 2016;7: 3–8. (In Russ.)
- Trifonova I. S. *Ecology and succession of lake phytoplankton*. Leningrad: Nauka; 1990. 182 p. (In Russ.)
- Voyakina E. Yu. *Phytoplankton of inland waters of the Valaam Archipelago and the adjacent area of Lake Ladoga: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis*. St. Petersburg; 2007. 23 p. (In Russ.)
- Weather archive in Priozersk. *Gismeteo*. (In Russ.) URL: <https://www.gismeteo.ru/weather-priozersk-3932/archive/> (accessed: 18.03.2026).

Поступила в редакцию / received: 24.02.2026; принята к публикации / accepted: 18.05.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Трифоновна Ирина Сергеевна

д-р биол. наук, профессор, ведущий научный сотрудник
e-mail: itrifonova@mail.ru

Стручкина Дарья Павловна

младший научный сотрудник
e-mail: daryastruchkina@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Trifonova, Irina

Dr. Sci. (Biol.), Professor, Leading Researcher

Struchkina, Darya

Junior Researcher

УДК [556.551:579.8]:[551.583+504.61](470.22)

МАССОВОЕ РАЗВИТИЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ В ОЗЕРАХ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Н. М. Калинкина¹, Т. В. Ефремова¹, Ю. Л. Сластина¹,
Т. Г. Кравченкова², Р. Э. Здоровеннов¹, Т. А. Ефремова¹,
Г. Э. Здоровеннова^{1*}

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. Александра Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*zdorovennova@gmail.com

² Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды –
филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (наб. Варкауса, 3, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185031)

Выполнен анализ многолетних (1950–2025 гг.) наблюдений за метеорологическими условиями, температурным и уровнем режимом, состоянием фитопланктона в озерах Ведлозеро и Крошнозеро (южная часть Республики Карелия), который позволил выявить закономерности эвтрофирования этих водоемов в условиях потепления климата. Показано, что в 2020-е годы в данных озерах участились случаи массового развития цианобактерий, в составе которых присутствуют виды, способные выделять в воду токсичные продукты метаболизма. Выявлен комплекс причин этих явлений, главными из которых являются высокая биогенная нагрузка, а также значительное повышение температуры воды, связанное с потеплением регионального климата. Летнее снижение уровня воды повышает температуру воды и концентрацию биогенных веществ, что ускоряет метаболизм водорослей и провоцирует их активный рост. Это явление становится регулярным в условиях эвтрофирования водоемов южной части Республики Карелия.

Ключевые слова: цианобактерии; фитопланктон; малое озеро; изменения климата; эвтрофирование; уровень воды; температура воды; таксономический состав; обилие

Для цитирования: Калинкина Н. М., Ефремова Т. В., Сластина Ю. Л., Кравченкова Т. Г., Здоровеннов Р. Э., Ефремова Т. А., Здоровеннова Г. Э. Массовое развитие цианобактерий в озерах Республики Карелия в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 111–125. doi: 10.17076/lim2320

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, FMEN 2026-0011).

**N. M. Kalinkina¹, T. V. Efremova¹, Yu. L. Slastina¹, T. G. Kravchenkova²,
R. E. Zdorovenov¹, T. A. Efremova¹, G. E. Zdorovenova^{1*}. CYANO-
BACTERIA BLOOMING IN LAKES OF THE REPUBLIC OF KARELIA
UNDER CLIMATE CHANGE AND HUMAN IMPACT**

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *zdrovennova@gmail.com

²Karelian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – branch of the Northwestern Hydrometeorology and Environmental Monitoring Administration (3 Varkaus St., 185031 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

An analysis of long-term (1950–2025) observations of meteorological conditions, temperature and water level regimes, and phytoplankton status in lakes Vedlozero and Kroshnozero (southern part of the Republic of Karelia) revealed patterns in the eutrophication of these lakes under climate warming. It was shown that in the 2020s, the lakes have experienced a rise in cyanobacteria blooming, including species capable of releasing toxic metabolic products. A complex set of causes for this phenomenon was identified, the main ones being high nutrient load and a significant rise in water temperature due to regional climate warming. Water level lowering in summer results in higher water temperatures and nutrient concentrations, accelerating algal metabolism and provoking their active growth. This phenomenon is becoming regular in the context of eutrophication of lakes in the southern part of Karelia.

Keywords: cyanobacteria; phytoplankton; small lake; climate change; eutrophication; water level; water temperature; taxonomic composition; abundance

For citation: Kalinkina N. M., Efremova T. V., Slastina Yu. L., Kravchenkova T. G., Zdorovenov R. E., Efremova T. A., Zdorovenova G. E. Cyanobacteria blooming in lakes of the Republic of Karelia under climate change and human impact. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 111–125. doi: 10.17076/lim2320

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (FMEN 2026-0011, Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS).

Введение

Антропогенное эвтрофирование озер происходит вследствие избыточного поступления в воду биогенных веществ. Особую опасность для водных экосистем представляют последствия эвтрофирования в виде массового развития цианобактерий [Paerl, Huisman, 2008]. Цветение воды с доминированием цианобактерий – обычное явление в эвтрофных озерах южных и средних широт [Сухаревич, Поляк, 2020]. В северных водоемах массовое размножение цианобактерий встречается значительно реже и бывает вызвано либо высокой антропогенной фосфорной нагрузкой на озеро, либо аномально теплой безветренной погодой и сильным прогревом воды [Кашулин, Беккелунд, 2022].

Тем не менее в Северо-Западном регионе России в последние годы участились вспышки массового развития водорослей [Беякова, 2006; Timakova et al., 2007; Чернова и др., 2014; Воякина и др., 2020]. Исследования в эти годы водоемов южной Карелии (озер Святозеро,

Ведлозеро, Крошнозеро) выявили обширные области цветения фитопланктона, которые распространялись на значительную часть акватории [Смирнова и др., 2021]. В оз. Ведлозеро осенью 2020 г. сложилась катастрофическая ситуация, когда значительная часть акватории была охвачена цветением, в связи с чем произошло резкое ухудшение качества воды. Хотя эпизоды цветения отмечались в указанных озерах и ранее, в 90-е годы XX века, это не приводило к существенному ухудшению качества воды [Современное..., 1998].

Продуктивность озер Карелии формируется под влиянием зональных климатических факторов, геологического строения водосборов и особенностей химического состава воды. Близость к арктическому региону и гумидный климат Карелии определяют низкую среднегодовую температуру воздуха, короткий вегетационный период и избыточное увлажнение. Геологические особенности региона и высокая степень заболоченности территории формируют специфические свойства водной среды –

низкие минерализацию, pH, концентрацию фосфора и повышенное содержание гумусового вещества, которые ограничивают продуктивность биоты [Теканова и др., 2018].

Повышение продуктивности (эвтрофирование) водоемов Карелии – это прямое следствие антропогенного воздействия, включая сбросы промышленных стоков и хозяйственно-бытовых сточных вод [Лозовик и др., 2013; Крупнейшие..., 2015]. В последние десятилетия в Республике Карелия интенсивно развивается форелеводство. В районе форелевых садков повышаются концентрации органических и биогенных веществ [Стерлигова и др., 2011], которые стимулируют массовое развитие фитопланктона. Ускорение размножения цианобактерий происходит при повышенной концентрации фосфора (20–100 мкг/л). Согласно литературным данным, цианобактерии способны «запасать» фосфаты в клетках и использовать их при исчерпании фосфора в воде. Еще одна особенность, отличающая их от других видов фитопланктона и дающая конкурентные преимущества, – это способность усваивать атмосферный азот [Toxic..., 2021].

Кроме антропогенного фактора предпосылкой для массового развития фитопланктона в озерах Карелии в последние десятилетия является повышение температуры поверхности воды в связи с потеплением климата. За последние 20 лет среднегодовая температура воздуха возросла на 1 °C по сравнению с климатической нормой 1960–1990 гг. [Назарова, 2017]. В современных условиях потепления климата ускоряется прогрев воды и увеличивается продолжительность «биологического лета» [Ефремова, Пальшин, 2015; Ефремова и др., 2016].

Цианобактерии приспособлены к широкому диапазону внешних условий, тем не менее их относят к теплолюбивым формам. Температурным оптимумом, катализирующим размножение цианобактерий, является диапазон 20–25 °C [Paerl, Huisman, 2008; Сухаревич, Поляк, 2020]. В связи с этим изменения климатических условий и экономических факторов (развитие форелеводства, туристической отрасли) являются факторами риска цветения воды. Это определило необходимость исследования массового развития цианобактерий в озерах Карелии. Актуальность данных исследований связана с проблемой качества воды в период цветения, т. к. цианобактерии выделяют токсины, опасные для жизни и здоровья человека и животных [Чернова и др., 2014; Toxic..., 2021]. Массовое разложение цианобактерий значительно ухудшает органолептические свойства воды,

санитарную обстановку, рекреационные возможности и рыбопромысловые качества водоемов.

Для выявления причин ухудшения экологического состояния водоемов проведен подробный анализ закономерностей эвтрофирования с учетом температурного, гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов двух озер – Ведлозеро и Крошнозеро. С этой целью были обобщены результаты многолетних наблюдений Института водных проблем Севера КарНЦ РАН на указанных озерах за период 1950–2025 гг. [Александрова и др., 1959; Харкевич, 1962; Современное..., 1998; Сабылина и др., 1998; Озера..., 2013; Сабылина, Ефремова, 2022, 2025; Макарова и др., 2025]. В качестве возможных причин усиления развития фитопланктона и цветения цианобактерий в озерах рассмотрены изменение концентрации биогенных элементов в воде, увеличение температуры воды, внутригодовое изменение уровня воды в многолетнем аспекте.

Объекты и методы исследований

Исследования проводились на озерах Ведлозеро и Крошнозеро, расположенных в южной части Республики Карелия (бассейн Балтийского моря) (рис. 1). В 1970–80-х годах интенсивная хозяйственная деятельность на водосборах привела к поступлению в воду этих озер большого количества биогенных элементов, что вызвало антропогенное эвтрофирование. Несмотря на снижение антропогенной нагрузки в последующие годы, климатические изменения привели к возобновлению процессов эвтрофирования. Эти озера являются важными объектами для изучения отклика водных экосистем на сочетание антропогенных нагрузок в предшествующие периоды их функционирования и современных климатических изменений.

Оз. Ведлозеро (61°33' с. ш. 32°42' в. д.) расположено на водосборе р. Видлица, притока Ладожского озера.

Площадь водосбора оз. Ведлозеро – 564 км², площадь зеркала озера – 58 км², средняя и максимальная глубины – 7,0 и 14,8 м, объем водной массы – 407 млн м³. Прозрачность воды 1,7 м. В озеро впадают реки Нялма, Вохтозерка и 18 ручьев, вытекает р. Видлица. Коэффициент условного водообмена 0,63 год⁻¹.

На берегах оз. Ведлозеро располагается старинное карельское поселение Ведлозеро с населением около 1000 человек, проживающих главным образом на восточном берегу озера. Озеро используется для водоснабжения,

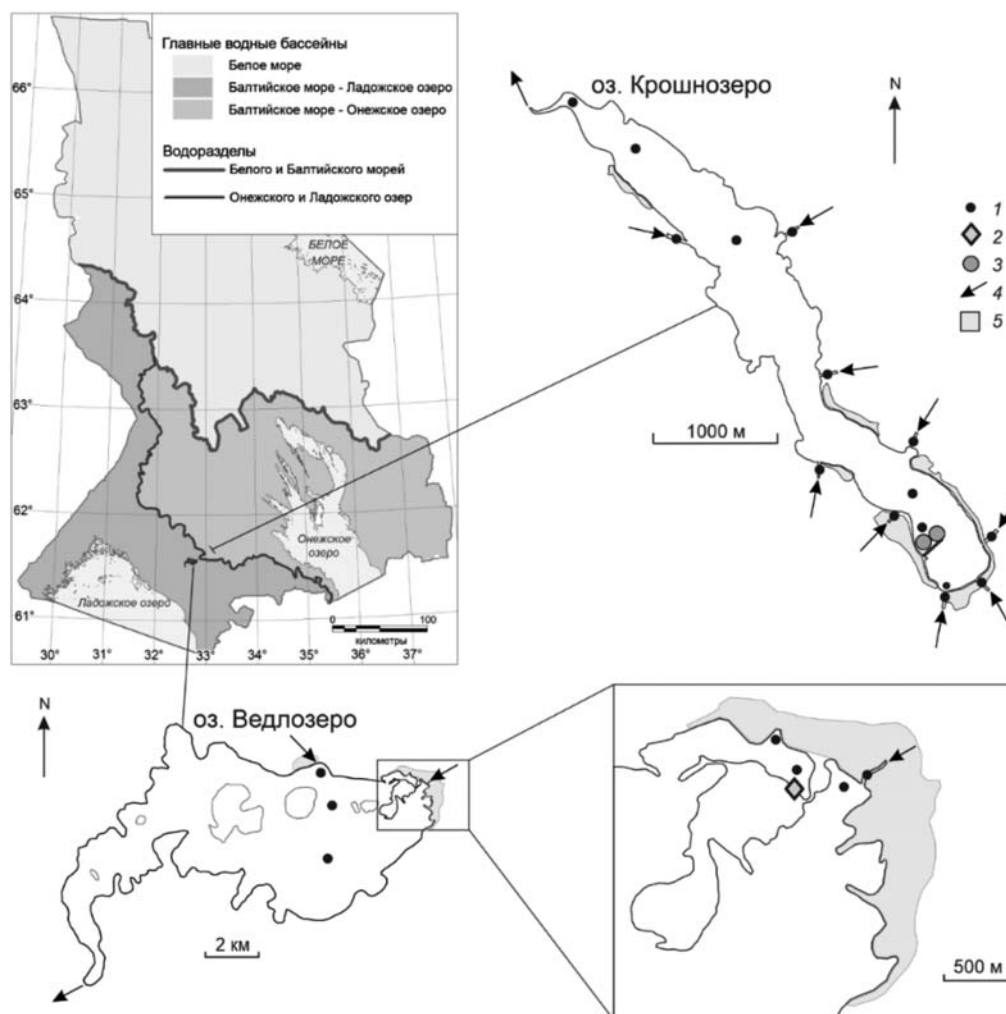


Рис. 1. Положение озер Ведлозеро и Крошнозеро на карте Карелии:

1 – станции измерений и отбора проб, 2 – гидрологический пост в оз. Ведлозеро, 3 – форелевые садки в оз. Крошнозеро, 4 – притоки озер, 5 – населенные пункты

Fig. 1. Location of Lakes Vedlozero and Kroshnozzero on the map of Karelia:

1 – measurement and sampling stations, 2 – hydrological post in Lake Vedlozero, 3 – trout cages in Lake Kroshnozzero, 4 – tributaries of the lakes, 5 – settlements

рекреации, рыбного промысла. В 1960–1990-е годы на берегах оз. Ведлозеро площади посевных угодий и производство продуктов животноводства достигли максимальных значений. Начиная с 2000-х годов произошел спад в сельском хозяйстве Карелии. Источниками загрязнения озера в настоящее время являются плохо очищенные коммунально-бытовые сточные воды села Ведлозеро и животноводческая ферма. Несмотря на значительное уменьшение нагрузки от сельскохозяйственных производств, в начале 2020-х годов в оз. Ведлозеро сложилась неблагоприятная экологическая ситуация – массовые вспышки цветения фитопланктона стали повторяться ежегодно в летне-осенний период и сопровождались резким ухудшением качества воды.

Оз. Крошнозеро (61°40' с. ш. 33°07' в. д.) расположено в водосборном бассейне реки Шуя, притока Онежского озера. Котловина озера ледникового происхождения, вытянута с северо-запада на юго-восток. Площадь водосборного бассейна озера составляет 173 км², площадь поверхности – 8,9 км², длина котловины – 10,4 км, средняя и максимальная ширина – 0,9 и 1,3 км соответственно, средняя глубина – 5,7 м, максимальная глубина – 12,6 м, объем водной массы – 50,5 млн м³ [Озера..., 2013]. В оз. Крошнозеро впадает несколько ручьев, в северной части акватории из озера вытекает река Матчелица. Коэффициент условного водообмена 1,14 год⁻¹. Прозрачность воды достигает 2,5 м. Водосбор озера достаточно освоен в хозяйственном отношении.

Здесь развито сельское хозяйство, высокая плотность населения. Озеро используется для водоснабжения, рекреации, рыбного промысла. Рыборазведение в озере начато в 1970-х годах. В настоящее время мощность садкового хозяйства составляет 50 т товарной форели в год [Ассоциация..., 2026]. В 1975–1990 гг. произошли значительные хозяйственные изменения на водосборе озера (сведение лесов, распашка земель, мелиорация). Однако сельскохозяйственные угодья на западном побережье озера сохранились. В последние три десятилетия увеличилась территория под дачные кооперативы.

Для написания статьи проведен сбор архивных и опубликованных материалов исследований химических и биологических показателей в озерах Ведлозеро и Крошнозеро в 1950–1990-е годы, проанализирована динамика антропогенной нагрузки за 70-летний период. Осенью 2020 г. и в разные сезоны 2021–2025 гг. в озерах Ведлозеро и Крошнозеро был выполнен анализ температурных условий и изучено состояние фитопланктонного сообщества озер (положение станций см. на рис. 1). Для исследования фитопланктона пробы воды объемом 500 мл, отобранные батометром Руттнера, фиксировали 10 мл 40% формалина и концентрировали на мембранных фильтрах (диаметр пор 0,8 мкм) до объема 5 мл [Методы..., 2024]. Видовую идентификацию проводили по определителям [Забелина и др., 1951; Матвиенко, 1954; Tikkanen, 1986] с помощью микроскопа Микмед-6. К доминирующим относили виды с численностью и/или биомассой более 10 %, к субдоминантам – более 5 %. При оценке трофического статуса исследуемых озер по концентрации общего фосфора, биомассе фитопланктона и содержанию хлорофилла *a* использовали классификацию [Китаев, 2007], по доле цианобактерий в общей численности фитопланктона – классификацию [Неверова-Дзюпак, Цветкова 2020]. Определение концентрации хлорофилла *a* (Chl-*a*) выполняли в 90% ацетоновом экстракте стандартным спектрофотометрическим методом, изложенным в руководствах [Determination..., 1966]. Химический анализ проводился с использованием оборудования Центра коллективного пользования КарНЦ РАН. Накопленный массив данных натурных измерений оформлен в виде базы данных [Макарова и др., 2025].

Для изучения уровня и термического режима оз. Ведлозеро использованы данные многолетних наблюдений Карельского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета на гидрологическом посту.

Проанализированы ряды среднемесячных и среднегодовых значений уровня воды в озере в 1972–2022 гг., средних декадных значений температуры воды в прибрежной зоне озера за май–октябрь в 1950–2022 гг. Для обработки данных многолетних наблюдений использовался метод линейного регрессионного анализа. Статистическая значимость линейных трендов определялась при 5% уровне значимости с использованием критерия Стьюдента ($p < 0,05$). Изменчивость погодных условий южной Карелии (температура воздуха и атмосферные осадки) проанализирована по данным метеостанций (МС) Петрозаводск и Сортавала за 1950–2022 гг. [Булыгина и др.].

Результаты и обсуждение

Региональная климатическая изменчивость южной Карелии

Климат Карелии на современном этапе характеризуется потеплением. Установлено, что в течение последних 50 лет (начиная с 1976 г. прошлого века) наблюдается выраженный рост температуры воздуха в южной Карелии (рис. 2).

Скорость повышения среднегодовой температуры воздуха в 1976–2022 гг. составляла 0,58 °C/10 лет на МС Петрозаводск и 0,64 °C/10 лет на МС Сортавала, летом – 0,46 и 0,45 °C/10 лет соответственно. В 2020–2022 гг. в период с мая по сентябрь количество дней со среднесуточной температурой воздуха >10 °C увеличилось по сравнению с климатической нормой 1961–1990 гг. на 14 и 12 суток (рис. 2, в), >20 °C – на 5 суток на обеих станциях (рис. 2, г). Период с мая по октябрь в 2020–2022 гг. был теплее климатической нормы на 1,2–2,1 °C. В сезонном аспекте наиболее быстро растет температура воздуха зимних месяцев. В 2020 г. наблюдался максимум среднегодовой температуры воздуха за всю историю инструментальных наблюдений: на МС Петрозаводск и Сортавала он составил +5,5 и +6,5 °C соответственно, что на 3,0–3,5 °C выше климатической нормы. Такой рост температуры обусловлен рекордно теплой зимой 2019/20 гг., когда средняя температура ноября–апреля была на 4,7 °C теплее нормы. Следующие две зимы были также теплее нормы на 1,3–2,8 °C.

По данным МС Петрозаводск, среднегодовое количество выпавших осадков за период 2000–2020 гг. увеличилось по сравнению с нормой 1961–1990 гг. на 36 мм и составило 615 мм, а по данным МС Сортавала – увеличилось на 99 мм и составило 700 мм. По данным МС Петрозаводск, в зимний сезон 2019/20 гг.

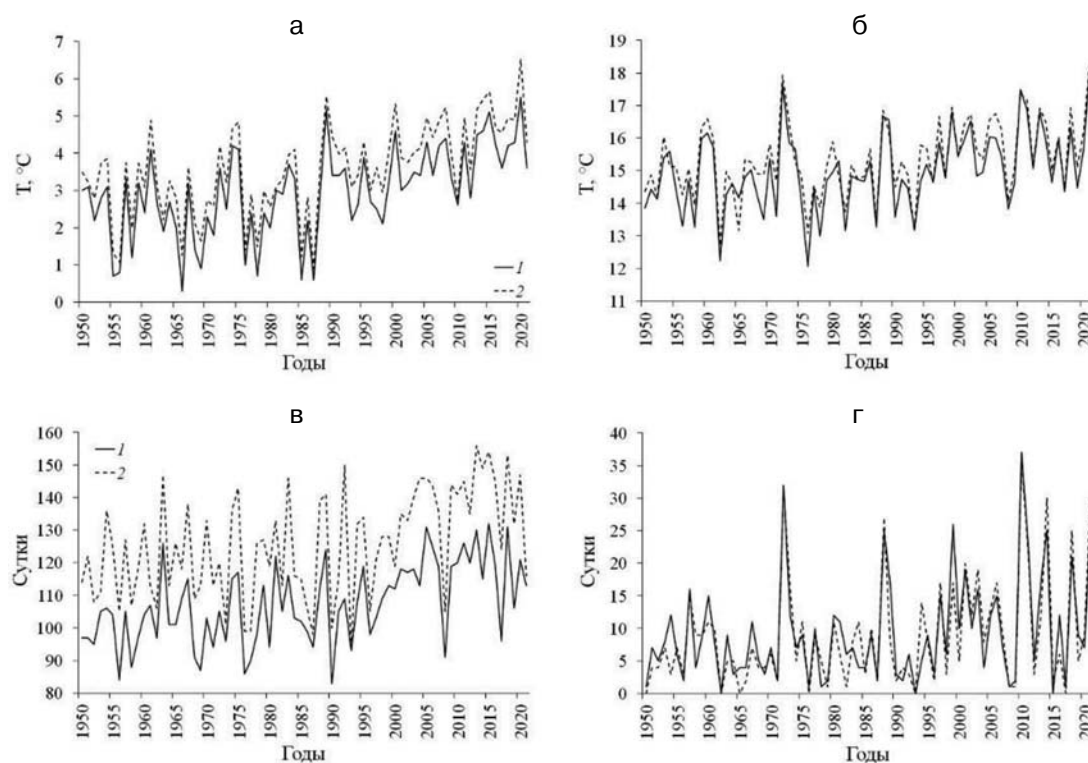


Рис. 2. Среднегодовая (а) и средняя летняя (июнь–август) температура воздуха (б), количество дней в мае–октябре со среднесуточной температурой $>10^{\circ}\text{C}$ (в) и $>20^{\circ}\text{C}$ (г). Данные МС Петрозаводск – 1, МС Сортавала – 2

Fig. 2. Average annual (a) and average summer (June–August) air temperature (б), number of days in May–October with average daily temperature $>10^{\circ}\text{C}$ (в) and $>20^{\circ}\text{C}$ (г). Data from the meteorological station of Petrozavodsk – 1, the meteorological station of Sortavala – 2

из-за частых и продолжительных оттепелей значительная часть осадков выпала в виде дождя и в период с ноября по апрель сумма осадков превысила норму на 60 мм. В зимний сезон 2021/22 гг. осадков выпало больше нормы на 36 мм. В период с мая по октябрь в 2020 и 2022 гг. количество осадков было меньше нормы на 70 и 78 мм, в тот же период 2021 г. – больше нормы на 16 мм.

Озеро Ведлозеро

Первые исследования оз. Ведлозеро были выполнены в 1953 г. Содержание минерального фосфора в воде озера изменялось в пределах 1–25 мкг/л. Среднее за год содержание общего фосфора составляло 20 мкг/л [Харкевич, 1962]. Вода оз. Ведлозеро характеризовалась повышенной цветностью (76 град. Pt-Co шкалы), что позволяло отнести водоем к мезогумусным. Летом 1953 г. в оз. Ведлозеро отмечалось интенсивное развитие водорослей *Aphanizomenon flos-aquae* и *Anabaena* sp., однако численность и биомасса фитопланктона определены не были [Александрова и др., 1959].

В 1990-е годы в озеро ежегодно поступало около 40–50 тыс. м³ коммунально-бытовых сточных вод села Ведлозеро [Сабылина и др., 1998; Озера..., 2013]. В 1992 г. концентрация минерального фосфора в воде оз. Ведлозеро в разные сезоны варьировала в пределах 1–14 мкг/л, содержание общего фосфора – в диапазоне 16–34 мкг/л (в среднем 25 мкг/л). По сравнению с 1950-ми годами содержание фосфора в оз. Ведлозеро увеличилось, тем не менее его трофический статус оставался в пределах мезотрофного. Весной в альгоценозах озера доминировали зеленые водоросли (53 % всей биомассы), им сопутствовали диатомовые (27 %) и пиррофитовые (12 %) водоросли. Максимальных значений биомасса фитопланктона достигала в летний период [Современное..., 1998]. В 1992–1994 гг. в биомассе фитопланктона доминировали цианобактерии (в среднем 40 %). В отдельных районах оз. Ведлозеро отмечались вспышки развития цианобактерий *Gloeotrichia echinulata* (Sm. & Sowerby) P. G. Richt. Биомасса фитопланктона в пятнах цветения варьировала в пределах 2–11 мг/л. Среднее для озера значение

биомассы летнего фитопланктона составило 7,4 мг/л, что соответствовало α -эвтрофному статусу водоема. Таким образом, за 30 лет трофический статус оз. Ведлозеро возрос.

В конце 2010-х годов сельскохозяйственная нагрузка на водосборную территорию оз. Ведлозеро понизилась. Объем коммунально-бытовых сточных вод, поступающих на очистные сооружения пос. Ведлозеро, уменьшился [Озера..., 2013]. Тем не менее осенью 2020 г. в водоеме возникла катастрофическая ситуация. В сентябре 2020 г. концентрации общего фосфора в поверхностном слое воды северо-восточного залива достигли экстремально высоких значений (534 мкг/л в центре и 1018 мкг/л у берега), что характеризовало залив как гипертрофный. В северном районе озера и, главным образом, в северо-восточном заливе в сентябре 2020 г. количественные показатели развития фитопланктона были весьма высокими. Так, в пятнах цветения в северо-восточном заливе численность, биомасса фитопланктона и концентрация Chl-a достигали 496–529 млн кл./л, 39–61 мг/л и 124–213 мкг/л соответственно, что указывало на гипертрофный статус. В северной части озера численность фитопланктона составила 3,1–11,8 млн кл./л, биомасса – 1,1–4,4 мг/л, концентрация Chl-a – 8,9–13,4 мкг/л, что по классификации С. П. Китаева [2007] свидетельствовало о мезотрофно-эвтрофном уровне. В северо-восточном заливе доля цианобактерий в общей численности фитопланктона составляла 98–99 %, в общей биомассе – 73–97 %, в северном районе оз. Ведлозеро – 90 и 20 % соответственно. Среди цианобактерий доминировали *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *Microcystis wesenbergii* (Komarek, 1968) и *Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & J. Komárek. Токсигенные штаммы этих видов, способные к выделению опасных для человека и домашних животных гепатотоксинов, обнаружены в водоемах Северо-Запада России, в том числе в Карелии [Белякова, 2006].

Сезонные исследования химического состава воды и состояния фитопланктона в оз. Ведлозеро в 2021, 2022, 2024 и в июле 2025 г. подтвердили чрезвычайно неблагоприятную экологическую ситуацию [Сабылина, Ефремова, 2022]. Данные по температуре поверхности воды, концентрации биогенных веществ и Chl-a в северной части оз. Ведлозеро представлены в таблице. Проведенные исследования свидетельствуют о резком возрастании в оз. Ведлозеро концентрации биогенных веществ. По содержанию общего фосфора трофический статус оз. Ведлозеро классифицируется как эвтрофный-гипертрофный. Это связано с поступлением

биогенных элементов с водами притоков. Концентрация общего фосфора в воде р. Вохтозерки на современном этапе составляет 66–124 мкг/л [Сабылина, Ефремова, 2022]. В таких условиях биогенные вещества не лимитируют развитие фитопланктона. Об этом свидетельствуют чрезвычайно высокие концентрации Chl-a: средние значения за вегетационный период 25–56 мкг/л, в отдельные годы – 178 мкг/л (гипертрофный статус). Высокие концентрации Chl-a, главным образом в летний период, отмечаются не только в северной части водоема (табл.), но и на большей части акватории. Так, в центральном районе озера средняя за 2021–2025 гг. концентрация Chl-a составила 28 мкг/л при максимальном уровне 50 мкг/л (эвтрофный статус). Таким образом, цветение охватывало большую часть акватории оз. Ведлозеро.

Из цианобактерий наиболее разнообразны роды типичных для летней альгофлоры региона *Aphanizomenon*, *Dolichospermum* (*Anabaena* – 4 таксона), *Microcystis* (3), *Oscillatoria* (2), которые вызывают цветение воды. Золотистые водоросли представлены видами из родов *Dinobryon*, *Mallomonas*, мелкоклоточных из рода *Kephyrion*. Разнообразие эвгленовых формируется представителями из родов *Trachelomonas* (4 таксона) и *Euglena*. Доля участия других отделов Xanthophyta, Cryptophyta, Dinophyta в формировании разнообразия альгофлоры невысока.

В 2021–2022 гг. в разные сезоны выявлен большой вклад цианобактерий в общие показатели численности и биомассы фитопланктона в оз. Ведлозеро. Так, в июле 2021 г. в северной части оз. Ведлозеро наблюдались максимальные уровни развития фитопланктона. При относительно небольшой биомассе (1,456 мг/л) численность фитопланктона достигала 10,6 млн кл./л вследствие малых объемов клеток цианобактерий. В этот период активно развивались *Dolichospermum flos-aquae* и *D. spiroides* Kleb., в совокупности их доля составила в суммарной численности до 70 %, в суммарной биомассе до 58 %. Доля *Microcystis aeruginosa* по численности достигала значений 16 % от общей, тогда как по биомассе только 5 %. Диатомовые также входили в комплекс доминантов по биомассе (до 24 %) за счет видов *Aulacoseira distans* и *A. granulata*. В сентябре 2021 г. в северной части оз. Ведлозеро наблюдались максимальные значения численности и биомассы за весь период открытой воды – 46,7 млн кл./л и 24 мг/л соответственно. Доминировали зеленые вольвовые водоросли (до 76 % биомассы, 84 % численности), *Eudorina elegans* Ehr. и *Pandorina morum* (O. F. Mull) Bory.

Температура поверхности воды и средние за вегетационный период показатели цветности (град. Pt-Co шкалы), концентрации биогенных веществ, общего железа и Chl-a в поверхностном слое воды в северной части оз. Ведлозеро в 2021, 2022, 2024 годах и июле 2025 г.

Water surface temperature and average color indices (Pt-Co scale degrees) for the growing season, concentrations of nutrients, total iron and chlorophyll a in the surface layer in the northern part of Lake Vedlozero in 2021, 2022, 2024, and July 2025

Годы Year	X, min, max	Показатели Indicators						
		T	N _{общ} N _{tot}	P _{мин} P _{min}	P _{общ} P _{tot}	Цветность Color	Fe _{общ} Fe _{tot}	Chl-a
2021	X	17,2	0,72	44	85	80	0,38	55,4
	min	9,6	0,51	5	47	58	0,29	35,6
	max	29,7	1,32	123	120	101	0,48	90,8
2022	X	19,4	0,59	28	50	74	0,32	56,0
	min	10,5	0,42	7	34	73	0,31	3,8
	max	24,5	0,76	49	66	75	0,33	178,5
2024	X	21,4	0,79	18	74	88	0,34	24,7
	min	18,9	0,41	3	36	75	0,31	6,6
	max	24,2	1,25	31	141	108	0,39	51,0
2025	Июль* July	26,4	0,54	5	49	62	0,24	36,9

Примечание. T – температура поверхности воды, N_{общ} – общий азот, мг N/л; P_{мин} – минеральный фосфор, мкг P/л; P_{общ} – общий фосфор, мкг P/л; Fe_{общ} – общее железо, мг/л; Chl-a – концентрация хлорофилла a, мкг/л. *Измерения выполнены только в июле 2025.

Note. T – water surface temperature, N_{tot} – total nitrogen, mg N/l; P_{min} – mineral phosphorus, µg P/l; P_{tot} – total phosphorus, µg P/l; Fe_{tot} – total iron, mg/l; Chl-a – chlorophyll a concentration, µg/l. *Measurements were taken only in July 2025.

В июне 2022 г. показатели численности и биомассы фитопланктона в северной части оз. Ведлозеро составили 2,5 млн кл./л и 1,165 мг/л соответственно. Отмечалось преобладание по численности цианобактерий (66 %), а по биомассе (51 %) – диатомовых водорослей, в основном принадлежащих к роду *Aulacoseira*. Цианобактерии массово развивались за счет *Microcystis aeruginosa*. Помимо зеленых, в массе представленных *Monoraphidium contortum* (Thur. in Breb.) Kom.-Legn., встречались золотистые и эвгленовые. В июле 2022 г. численность фитопланктона составила 3,2 млн кл./л, биомасса – 1,49 мг/л. До 60 % численности формировалось за счет цианобактерий из родов *Microcystis*, *Anabaena*, *Snowella*, биомасса до 50 % – за счет диатомовых рода *Aulacoseira*. В августе 2022 г. показатели численности и биомассы составили 6,0 млн кл./л и 4,57 мг/л соответственно. По численности (43 %) массово представлены цианобактерии *Microcystis aeruginosa*, *Planctolyngbia limnetica* (Lem.) Kom-Legn & Cronb., по биомассе в фитопланктоне доминировали диатомовые рода *Aulacoseira* (93,5 %). Таким образом, по величине биомассы фитопланктона и концентрации Chl-a в 2021–2022 гг. оз. Ведлозеро соответствовало мезотрофному-эвтрофному статусу, по доле цианобактерий в общей численности фитопланктона – мезотрофному.

В 2024-м и в июле 2025 г. анализировались данные по содержанию Chl-a в воде. Сведения по содержанию Chl-a в 2024 г. (24,7 мкг/л) и в июле 2025 г. (36,9 мкг/л) свидетельствуют о высоком уровне развития фитопланктона, что подтверждает данные 2021–2022 гг. о неблагоприятной ситуации в настоящее время.

Чрезвычайно высокие уровни развития фитопланктона, отмечаемые в 2020–2022 гг., со значительным участием потенциально опасных цианобактерий, ранее не отмечались в течение 70-летнего периода наблюдений. Важным фактором, объясняющим масштабное развитие фитопланктона в последние годы в оз. Ведлозеро, являются температурные условия. В течение 2021–2025 гг. отмечены продолжительные периоды (около одного-двух месяцев) экстремально высокого прогрева поверхностного слоя воды озер Карелии со средними значениями в пределах 17–21 °C и максимальными 24–29 °C [Макарова и др., 2025]. Аномальная ситуация в оз. Ведлозеро в связи с климатическими изменениями была доказана с привлечением данных по метеорологическим условиям (температура воздуха), температуре воды и уровню воды в оз. Ведлозеро за 1950–2022 гг.

Как известно, на многолетнюю изменчивость температуры поверхностного слоя воды в первую очередь влияют межгодовые колебания

приземной температуры воздуха. Коэффициенты корреляции среднемесячных значений температуры воздуха на МС Петрозаводск и Сортавала и температуры воды поверхностного слоя оз. Ведлозеро за июнь–октябрь в 1950–2021 гг. равнялись 0,88–0,89. Оценка изменений температуры воды в календарные месяцы за 70-летний период показала, что в течение всей теплой половины года отмечается повышение температуры воды озера. В среднем за май–октябрь рост температуры воды в 2000-е годы по сравнению с нормой составил 1,6 °С, наибольший – в мае (2,3 °С) и августе–сентябре (1,8 °С).

Статистически значимые положительные линейные тренды температуры поверхности воды оз. Ведлозеро ($p < 0,01$) установлены для всех месяцев безледоставного периода. В 1950–2020 гг. скорость роста температуры воды в озере в июне–августе составила 0,35 °С/10 лет (рис. 3, а). В 1976–2020 гг. скорость роста температуры увеличилась и составила в мае–октябре 0,59 °С/10 лет, а в летние месяцы – 0,49 °С/10 лет.

Переход температуры воды через 10 °С в сторону повышения наступает в оз. Ведлозеро во второй половине мая. По сравнению с нормой начало «биологического лета» сдвинулось в 2000-е годы на 8 суток к более ранней дате – на 18 мая. Осенью дата перехода температуры воды через 10 °С в базовый период в среднем наблюдалась 26 сентября, а в 2000-е годы – 4 октября. В 2000-е годы средняя продолжительность «биологического лета» составила 139 суток, увеличившись на 15 суток по сравнению с нормой (рис. 3, б). За 1976–2020 гг. коэффициент линейного тренда дат перехода температуры воды через 10 °С весной составил 2,1 сут/10 лет, осенью 3,2 сут/10 лет ($p < 0,05$).

В 2020 г. лето отличалось теплой и маловетреной погодой. Такой тип погоды способствовал прогреву верхнего слоя воды: по данным гидрологического поста среднемесячная температура поверхности воды в июне, июле и августе равнялась 19,4, 20,7 и 20,1 °С соответственно. Со второй декады июня по вторую декаду августа среднедекадная температура воды составляла 20,1–21,5 °С, за исключением первой декады августа (19,7 °С). В третьей декаде августа температура воды равнялась 19,6 °С. Лето 2021 г. было экстремально жарким. Средняя температура поверхностного слоя воды за июнь–август превысила рекорд 2010 г. на 0,2 °С и составила 22,1 °С. Среднемесячная температура поверхности воды в июне, июле и августе равнялась 22,2, 24,6 и 19,6 °С соответственно. С третьей декады июня по вторую декаду июля температура воды превышала 26 °С, наиболее теплой была вторая декада июля со средней температурой 27,2 °С. Таким образом, в последние несколько лет в оз. Ведлозеро отмечается аномально сильный прогрев воды. В эти годы в озере отмечались и экстремально высокие показатели развития фитопланктона, в том числе цианобактерий.

Анализ динамики среднегодового уровня воды оз. Ведлозеро в 1972–2022 гг. показал отсутствие статистически значимых изменений (рис. 4).

Однако в последние годы существенно изменилось внутригодовое распределение колебаний уровня: в зимние месяцы (январь–март) наблюдается его подъем, а в летние (июнь–август) – падение. Среднегодовое значение уровня оз. Ведлозеро в 1972–2022 гг. составило 54 см, наименьшее – 40 см, наивысшее – 83 см (рис. 4).

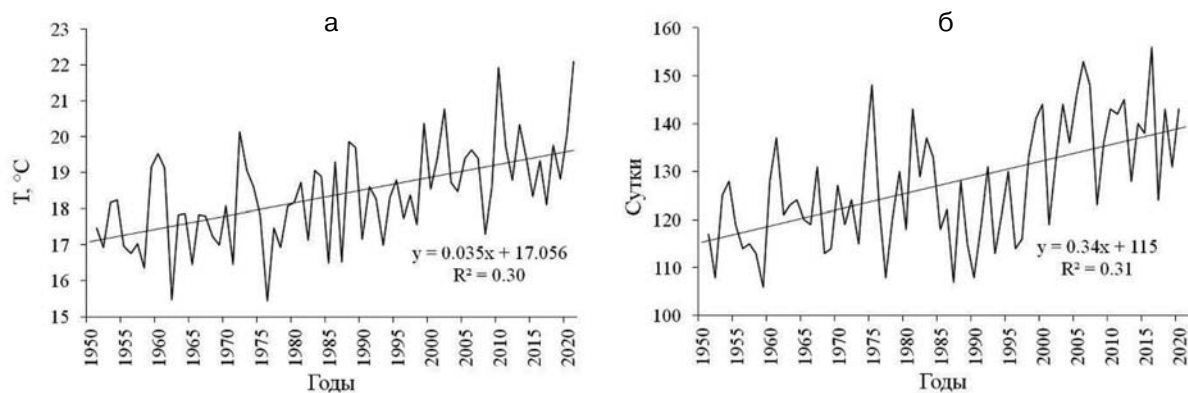


Рис. 3. Средняя температура поверхности воды за июнь–август (а) и продолжительность периода с температурой поверхности воды оз. Ведлозеро > 10 °С (б) в 1950–2022 гг. Прямые линии – линейные тренды
Fig. 3. Average water surface temperature for June–August (a) and duration of the period with water surface temperature of Lake Vedlozero > 10 °C (б) in 1950–2022. Straight lines are linear trends

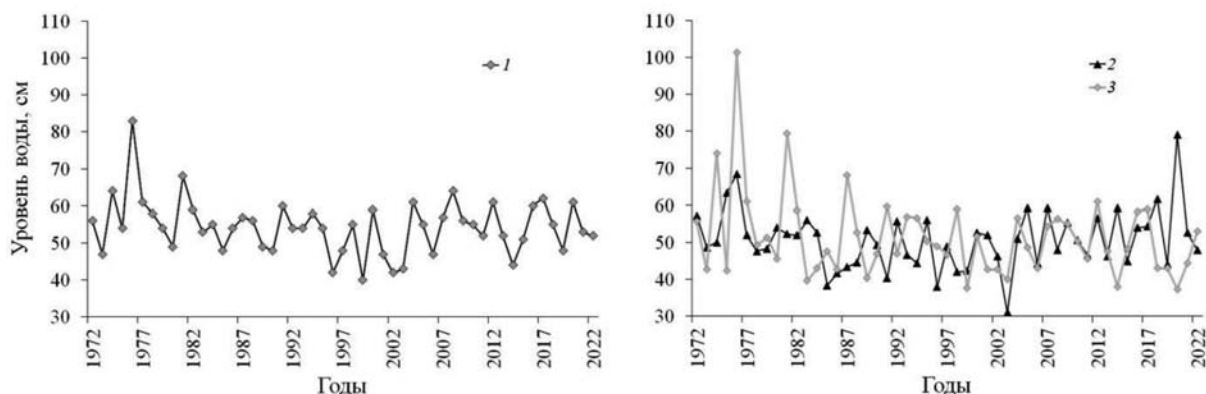


Рис. 4. Многолетние колебания уровня воды в оз. Ведлозеро: среднегодовой уровень (1), средний уровень за январь–март (2); средний уровень за июнь–август (3)

Fig. 4. Long-term fluctuations in the water level in Lake Vedlozero: average annual level (1), average level for January–March (2); average level for June–August (3)

Самый низкий уровень за рассматриваемый период наблюдался в августе–сентябре, а самый высокий – в мае–июне после активного таяния снега. Диапазон сезонных колебаний среднемесячного уровня составил от 17 до 112 см. Стоит отметить, что 2020 г. был уникальным по режиму колебаний уровня за весь исследуемый период: зимой 2020 г. наблюдался самый высокий уровень (в январе–марте среднее значение составило 79 см, что на 28 см выше среднемноголетних значений), летом 2020 г. – самый низкий (в июне, июле и августе среднемесячные значения составили 48, 33 и 31 см соответственно, что на 12, 13 и 10 см ниже среднемноголетних значений; в июне такой низкий уровень ранее наблюдался только в 2003 г., а в июле это минимальное значение за все исследуемые годы).

В литературе приводятся сведения, что снижение уровня воды летом вызывает увеличение времени задержки и повышение концентрации биогенных веществ в толще воды и температуры мелководных слоев, что может привести к интенсивному цветению цианобактерий [Bakker, Hilt, 2016]. Кроме того, снижение уровня воды в летний период в оз. Ведлозеро способствует ускорению обменных процессов в системе «вода – донные отложения», что объясняет резкое увеличение содержания фосфора в водной толще оз. Ведлозеро в последние годы – 50–85 мкг/л (см. табл.).

Озеро Крошнозеро

В начале 1950-х годов оз. Крошнозеро уже было эвтрофным водоемом. Среднегодовая концентрация $P_{\text{мин}}$ в поверхностном и придонном горизонтах составляла 15 и 21 мкг/л и

$P_{\text{общ}}$ – 29 и 34 мкг/л соответственно [Харкевич, 1956]. В последующие 30 лет (с 1986 г.) вследствие активной сельскохозяйственной деятельности на водосборе существенно выросла и концентрация $P_{\text{общ}}$ в озере (в поверхностном слое на 22 мкг/л, в придонном на 29 мкг/л) [Поверхностные..., 1991]. В настоящее время в 2,7 раза увеличилась концентрация биогенных элементов (минерального и общего фосфора) в водах западных притоков (от 32–36 мкг/л $P_{\text{мин}}$ в 50-е годы до 86–96 мкг/л $P_{\text{мин}}$ в 2022 г.) [Сабылина, Ефремова, 2025]. Содержание $P_{\text{общ}}$ в воде озера продолжает расти. В летний период 2023 г. вблизи форелевого хозяйства содержание $P_{\text{общ}}$ в придонном слое достигало максимальных значений – 198 и 176 мкг/л соответственно.

Измерения температуры воды оз. Крошнозеро в 2021–2025 гг. показали, что с мая по сентябрь водная толща озера находится в состоянии устойчивой стратификации. На фоне длительного периода стратификации происходит снижение содержания растворенного кислорода в придонных слоях озера (менее 1–2 мг/л). В этих условиях в гипolimнии фосфор мобилизуется из донных отложений, и создается дополнительная (внутренняя) фосфорная нагрузка [Сабылина, Ефремова, 2025], что способствует дальнейшему росту продуктивности фитопланктона в озере, уже независимо от поступления его с водосбора. Таким образом, на современном этапе озеро перешло в новую стадию развития процесса эвтрофирования.

В составе фитопланктонного сообщества оз. Крошнозеро в период с 1959 по 1994 г. [Покровский, Филимонова, 1959; Чекрыжева

1993, 1998] определено 93 таксона из 8 систематических групп: Cyanophyta – 6 (6,5 %), Chrysophyta – 14 (15,1 %), Bacillariophyta – 36 (38,7 %), Xanthophyta – 1 (1,1 %), Cryptophyta – 2 (2,2 %), Dinophyta – 3 (3,2 %), Euglenophyta – 4 (4,3 %), Chlorophyta – 27 (29 %). В настоящее время в составе фитопланктона выявлен 31 таксон водорослей рангом ниже рода, принадлежащих к 6 систематическим отделам: зеленые (Chlorophyta) – 7 (22,6 %), диатомовые (Bacillariophyta) – 8 (25,8 %), золотистые (Chrysophyta) – 3 (9,7 %), синезеленые (Cyanophyta) – 10 (32,3 %), эвгленовые (Euglenophyta) – 2 (6,5 %), динофитовые (Dinophyta) – 1 (3,2 %). Значения биомассы фитопланктона летом 2021 г. в озере в среднем не превышали 12,3 мг/л при максимальной величине 13,3 мг/л, а значения численности в среднем были 86,2 млн кл./л при максимуме 92,8 млн кл./л.

Летом верхние слои водной толщи хорошо прогреваются – в частности, в июле 2021 г. температура верхнего слоя озера повысилась до 27–29 °С, при этом температура придонных слоев не превышала 8–9 °С. Аномальный прогрев верхнего слоя воды способствует активному развитию цианобактерий и длительному цветению воды. В летний период 2021 г. доминантами как по численности, так и по биомассе являлись цианобактерии. В основном это представители видов, вызывающих цветение водоемов Северо-Запада России в летний период, такие как *Dolichospermum flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa* Kutz. emend. Elenk., *Microcystis wesenbergii* (Kom.) Starm. Наибольшее количество цианобактерий отмечено возле форелевого хозяйства, преимущественно за счет скопления цианобактерии *Microcystis aeruginosa*, численность которой достигала 67 млн кл./л. Также многочисленны были колонии *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák в поверхностном горизонте озера, максимум по численности для этого вида (13 млн кл./л) зарегистрирован в глубоководной южной котловине озера. В сравнении с более ранними исследованиями видовой состав цианобактерий стал разнообразнее, появилась *Gloetrichia echinulata* (J. E. Smith et Sowerby) P. Richt., обитающая обычно в высокоэвтрофных водоемах. В состав доминирующего комплекса по биомассе входила также динофитовая *Ceratium hirundinella* (O. F. Müll.) Schrank (до 2 мг/л). Эвгленовые были представлены *Trachelomonas volvocina* Ehr. Диатомовые, доминировавшие ранее в озере в летний период, согласно литературным данным, летом 2021 г. имели достаточно низкие значения численности и биомассы, как и представители

других отделов. Согласно полученным ранее сведениям [Покровский, Филимонова, 1959; Чекрыжева, 1993, 1998], в период с 1959 по 1994 г. массовыми видами летом были представители рода *Aulacoseira*, составляя свыше 50 % численности и биомассы всего фитопланктона. В настоящее время наиболее часто встречаются в пробах *Fragilaria crotonensis* Kitton, биомасса до 0,6 мг/л. Таким образом, в отличие от результатов исследований 1959–1994 гг., установлено, что на современном этапе значительный вклад в формирование общей биомассы и численности (лето 2021 г.) вносят представители цианобактерий и динофитовых водорослей. Резко выросло влияние цианобактерий, продуцирующих до 98 % численности и 80 % биомассы от общих показателей. Основу доминирующего комплекса представляют потенциально токсичные цианобактерии из родов *Anabaena*, *Aphanizomenon* и *Microcystis*. Увеличилось видовое разнообразие цианобактерий, а представителей других отделов, в частности зеленых, резко уменьшилось.

Сопоставление результатов, полученных в период открытой воды 1990, 1994 и 2021 гг., показало, что они значительно различаются по структурным характеристикам, тогда как количественные характеристики сопоставимы. По данным Т. А. Чекрыжевой [1993, 1998], максимальные значения биомассы достигали 32 мг/л, а численности – 50 млн кл./л, однако средние составляли соответственно около 10 мг/л, при численности 13 млн кл./л. В 1990-х годах средние значения биомассы и численности были ниже, чем в 2020-х. Тем не менее там же упоминаются длительные периоды цветения цианобактериями (1952–1953, 1970–1990 гг.). В 1998 г. по величине биомассы (9,9 мг/л) оз. Крошнозеро также характеризовалось как высокоэвтрофный водоем [Чекрыжева, 1993]. По классификациям [Китаев, 2007; Неверова-Дзюпак, Цветкова, 2020] средние значения биомассы в поверхностном горизонте озера (12,3 мг/л), а также доля цианобактерий в общей численности фитопланктона (более 85 %) позволяют охарактеризовать водоем как эвтрофный.

Заключение

В последние годы в озерах Ведлозеро и Крошнозеро регулярно отмечаются опасные явления в виде массового развития фитопланктона с участием цианобактерий, в составе которых присутствуют виды, способные выделять в воду токсичные продукты метаболизма.

Эти явления объясняются высокой биогенной нагрузкой в сочетании со значительным повышением температуры воды озер (например, в оз. Ведлозеро 0,4–0,6 °C/10 лет в последние пять десятилетий) в условиях потепления регионального климата. Ускорению нагрева воды также способствует снижение уровня воды в озерах в летний период, при этом происходит ускорение обменных процессов между донными отложениями и водой и резкое увеличение содержания фосфора (до 140 мкг/л) в оз. Ведлозеро. В озере Крошнозеро длительная стратификация водной толщи и бескислородные условия в гипolimнии способствуют мобилизации фосфора из донных отложений и вторичной фосфорной нагрузке.

Таким образом, климатические изменения в Республике Карелия ускоряют эвтрофирование озер, подверженных антропогенному воздействию. На озерах, берега которых интенсивно застроены частными домами, необходима организация экологического мониторинга с тщательным контролем фосфорной нагрузки, состояния фитопланктона, уровня развития токсичных видов водорослей и с оценкой концентрации цианотоксинов. Важными мерами являются снижение поверхностного стока за счет ограниченного внесения удобрений, устройство дренажа вокруг полей, организация защитных полос вдоль кромки берега и периодическое выкашивание прибрежной водной растительности, накапливающей биогенные вещества.

Литература

- Александрова Т. Н., Гордеева-Перцева Л. И., Гордеева Л. Н., Стефановская Л. Ф. Оз. Ведлозеро (водохранилище) // Озера Карелии. Природа, рыбы и рыбное хозяйство. Справочник. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1959. С. 410–417.
- Ассоциация форелеводов Карелии [Электронный ресурс]. URL: <http://kareliatrout.ru/karta-rybnyh-hozjajstv/> (дата обращения: 03.04.2026).
- Белякова Р. Н. Водоросли, вызывающие «цветение» водоемов Северо-Запада России. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2006. 367 с.
- Булыгина О. Н., Веселов В. М., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014620549. Рег. 10.04.2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/163-basi-sragameters#описание-массива-данных> (дата обращения: 17.02.2026).
- Воякина Е. Ю., Русских Я. В., Чернова Е. Н., Жакановская З. А. Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоемах Северо-Запада России // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 124–129. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-124-129
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Многолетняя изменчивость температуры воды и ледовая фенология // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: Современное состояние и изменение экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 38–44.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Белашев Б. З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43(2). С. 228–238. doi: 10.7868/S0321059616020024
- Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова В. С. Диатомовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Советская наука, 1951. 620 с.
- Кашулин Н. А., Беккелунд А. К. Изменения климата и цветение арктического озера Имандра // Биосфера. 2022. Т. 14, № 2. С. 98–125. doi: 10.24855/biosfera.v14i2.673
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
- Лозовик П. А., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Химический состав озерных вод // Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 30–37.
- Макарова Е. М., Здоровеннова Г. Э., Икко О. И., Здоровеннов Р. Э., Митрохов А. В., Сярки М. Т., Сабылина А. В., Новикова Ю. С., Сидорова А. И., Калинин Н. М., Сластина Ю. Л., Пальшин Н. И. Состояние и условия обитания планктонного сообщества малых озер Карелии. База данных RU 2025624656. Дата регистрации: 20.10.2025. Дата публикации: 23.10.2025.
- Матвиенко А. М. Золотистые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Советская наука, 1954. 95 с.
- Методы гидробиологических исследований внутренних вод / Под ред. А. В. Крылова. Борок: ИБВВ РАН; Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.
- Назарова Л. Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // Известия РГО. 2017. Т. 149, вып. 5. С. 16–24.
- Неверова-Дзюпак Е. В., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.
- Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия / Отв. ред. П. А. Лозовик, В. А. Фрейндлинг. Петрозаводск: Карелия, 1991. 212 с.
- Покровский В. В., Филимонова З. И. Озеро Крошнозеро // Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1959. С. 199–205.

Сабылина А. В., Ефремова Т. А. Изменение химического состава вод озера Ведлозеро и отдельного его залива в результате антропогенного эвтрофирования // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 8. С. 20–30. doi: 10.17076/eco1718

Сабылина А. В., Ефремова Т. А. Особенности химического состава, трансформация и круговорот вещества в эвтрофном озере Крошнозеро (Республика Карелия) // Водные ресурсы. 2025. Т. 52, № 5. С. 55–67. doi: 10.31857/S0321059625050051

Сабылина А. В., Мартынова Н. Н., Басов М. И. Водоемы среднего участка реки Шуи и озеро Ведлозеро // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1998. С. 139–145.

Смирнова В. С., Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Чернова Е. Н. Состояние фитопланктона в пятне «цветения» в озере Святозеро (бассейн Онежского озера, Россия) // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 1(85). С. 50–60. doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60

Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. / Отв. ред. Н. Н. Филатов, Т. П. Куликова, П. А. Лозовик. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1998. 188 с.

Стерлигова О. П., Китаев С. П., Ильмаст Н. В., Комулайнен С. Ф., Кучко Я. А., Павловский С. А., Савосин Е. С. Состояние заливов Онежского озера при товарном выращивании радужной форели // Поволжский экологический журнал. 2011. № 3. С. 386–393.

Сухаревиц В. И., Поляк Ю. М. Глобальное распространение цианобактерий: причины и последствия (обзор) // Биология внутренних вод. 2020. № 6. С. 562–572. doi: 10.31857/S0320965220060170

Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Кравченко И. Ю. Геохимические особенности функционирования биоты в водоемах Карелии // Известия РАН. Сер. геогр. 2018. № 1. С. 90–100. doi: 10.7868/S2587556618010083

Харкевич Н. С. Гидрохимическая характеристика Миккельского озера и Крошнозера // Труды Карельского филиала АН СССР. 1956. Вып. 2. С. 56–88.

Харкевич Н. С. Сток растворенных веществ рек Олонки, Видлицы и Тулемы в Ладожское озеро // Труды Института зоологии и ботаники АН Эстонской ССР. Гидробиологические исследования. 1962. Т. 111. С. 35–40.

Чекрыжева Т. А. Водоемы среднего участка реки Шуи и озеро Ведлозеро. Фитопланктон // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1998. С. 148–150.

Чекрыжева Т. А. Фитопланктон оз. Крошнозера при антропогенном эвтрофировании // Водная растительность внутренних водоемов и качество их вод: Мат-лы III Всерос. конференции (Петрозаводск, сентябрь 1992 г.). Петрозаводск, 1993. С. 19–20.

Чернова Е. Н., Русских Я. В., Воякина Е. Ю., Жаконская З. А. Исследования природных экотоксикантов – метаболитов синезеленых водорослей

в разнотипных водоемах северо-запада России // Региональная экология. 2014. № 1–2(35). С. 88–95.

Bakker E. S., Hilt S. Impact of water-level fluctuations on cyanobacterial blooms: options for management // Aquat. Ecol. 2016. Vol. 50. P. 485–498. doi: 10.1007/s10452-015-9556-x

Determination of photosynthetic pigments in sea waters. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. France: UNESCO, 1966. 69 p.

Paerl H. W., Huisman J. Blooms like it hot // Science. 2008. Vol. 320. P. 57–58. doi: 10.1126/science.1155398

Tikkanen T. Kasviplanktonopas. Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy. Helsinki: Forssa, 1986. 277 p.

Timakova T. M., Kalinina N. M., Lozovik P. A. The state of ecosystem of lake Lekshmozero after a mass fish kill // Hydrobiol. J. 2007. Vol. 43, no. 2. P. 89–92. doi: 10.1615/Hydrobiol.v43.i2.100

Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management / I. Chorus, M. Welker (eds.). London: Taylor & Francis, 2021. 858 p. doi: 10.1201/9781003081449

References

Aleksandrova T. N., Gordeeva-Pertseva L. I., Gordeeva L. N., Stefanovskaya L. F. Lake Vedlozero (reservoir). Ozero Karelii. Priroda, ryby i rybnoe khozyaistvo. Spravochnik = Lakes of Karelia. Nature, fish and fisheries. A reference book. Petrozavodsk: Gosizdat KASSR; 1959. P. 410–417. (In Russ.)

Association of Trout Breeders of Karelia. (In Russ.). Website. URL: <http://kareliatrout.ru/karta-rybnyh-hozjajstv/> (accessed: 03.04.2026).

Bakker E. S., Hilt S. Impact of water-level fluctuations on cyanobacterial blooms: options for management. Aquat. Ecol. 2016;50:485–498. doi: 10.1007/s10452-015-9556-x

Belyakova R. N. Algae causing “blooming” in water bodies of Northwest Russia. Moscow: KMK; 2006. 367 p. (In Russ.)

Bulygina O. N., Veselov V. M., Razuvaev V. N., Aleksandrova T. M. Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at stations in Russia. Certificate of state registration of database No. 2014620549. Reg. 10.04.2014. Website. (In Russ.). URL: <http://meteo.ru/data/163-basicparameters#описание-массива-данных> (accessed: 17.02.2026).

Chekryzheva T. A. Reservoirs of the middle section of the Shuya River and Lake Vedlozero. Sovremennoe sostoyanie vodnykh ob"ektov Respubliki Kareliya = Current state of water bodies in the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1998. P. 148–150. (In Russ.)

Chekryzheva T. A. Phytoplankton of Lake Kroshnozero under anthropogenic eutrophication. Vodnaya rastitel'nost' vnutrennikh vodoemov i kachestvo ikh vod: Mat-ly III Vseros. konf. (Petrozavodsk, sentyabr' 1992 g.) = Aquatic vegetation of inland water bodies and the quality of their waters: Proceed. III All-Russ. conf. (Petrozavodsk, Sept., 1992). Petrozavodsk; 1993. P. 19–20. (In Russ.)

Chernova E. N., Russkikh Ya. V., Voyakina E. Yu., Zhakovskaya Z. A. Studies of natural ecotoxins –

metabolites of blue-green algae in different types of water bodies of northwestern Russia. *Regional'naya ehkologiya = Regional Ecology*. 2014;1–2(35):88–95. (In Russ.)

Chorus I., Welker M. (eds.). Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management. London: Taylor & Francis; 2021. 858 p. doi: 10.1201/9781003081449

Determination of photosynthetic pigments in sea waters. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. France: UNESCO; 1966. 69 p.

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Long-term variability of water temperature and ice phenology. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: Sovremennoe sostoyanie i izmenenie ehkosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West of European Russia: Current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 38–44. (In Russ.)

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Belashev B. Z. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011. *Water Resources*. 2016;43(2): 402–411. doi: 10.1134/S0097807816020020

Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs of the North-West of European Russia: Current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia: a reference book. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Kulikova T. P., Lozovik P. A. (eds.). Current state of water bodies in the Republic of Karelia. Based on the results of monitoring in 1992–1997. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1998. 188 p. (In Russ.)

Kashulin N. A., Bekkelund A. K. Climate change and blooming of the Arctic Lake Imandra. *Biosfera = Biosphere*. 2022;14(2):98–125. (In Russ.). doi: 10.24855/biosfera.v14i2.673

Kharkevich N. S. Dissolved matter discharge from the Olonka, Vidlitsa, and Tulema Rivers into Lake Ladoga. *Trudy Instituta zoologii i botaniki AN Ehstonskoi SSR. Gidrobiol. issledovaniya = Proceed. of the Institute of Zoology and Botany of the Academy of Sciences of the Estonian SSR. Hydrobiol. studies*. 1962;111:35–40. (In Russ.)

Kharkevich N. S. Hydrochemical characteristics of Lakes Mikkelskoe and Kroshnozero. *Trudy Karel'skogo filiala AN SSSR = Transactions of the Karelian Branch of the Academy of Sciences of the USSR*. 1956;2:56–88. (In Russ.)

Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 395 p. (In Russ.)

Krylov A. V. (ed.). Methods of hydrobiological studies of inland waters. Borok: IBVV RAN; Yaroslavl': Filigran'; 2024. 592 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Freindling V. A. (eds.). Surface waters of the lake–river system of Shuya under anthropogenic impact. Petrozavodsk: Karelia; 1991. (In Russ.)

Lozovik P. A., Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Chemical composition of lake waters. *Ozera Karelii. Spravochnik*

= *Lakes of Karelia. A reference book*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. P. 30–37. (In Russ.)

Makarova E. M., Zdorovenova G. E., Ikko O. I., Zdorovenov R. E., Mitrokhov A. V., Syarki M. T., Sabylina A. V., Novikova Yu. S., Sidorova A. I., Kalinkina N. M., Slastina Yu. L., Pal'shin N. I. The state and habitat conditions of the plankton community of small lakes in Karelia. Database RU 2025624656. Registration date: 20.10.2025. Publication date: 23.10.2025. (In Russ.)

Matvienko A. M. Golden algae. An identification guide to freshwater algae of the USSR. Moscow: Sovetskaya nauka; 1954. 95 p. (In Russ.)

Nazarova L. E. Modern climatic conditions of the White Sea basin area. *Izvestiya RGO = Bulletin of the Russian Geographical Society*. 2017;149(5):16–24. (In Russ.)

Neverova-Dziopak E. V., Tsvetkova L. I. Assessment of the trophic state of surface waters: a monograph. St. Petersburg: SPbGASU; 2020. 176 p. (In Russ.)

Paerl H. W., Huisman J. Blooms like it hot. *Science*. 2008;320:57–58. doi: 10.1126/science.1155398

Pokrovsky V. V., Filimonova Z. I. Lake Kroshnozero. *Ozera Karelii. Spravochnik = Lakes of Karelia. A reference book*. Petrozavodsk: Gosizdat KASSR; 1959. P. 199–205. (In Russ.)

Sabylina A. V., Efremova T. A. Changes in water chemical composition in Lake Vedlozero and one of its bay as a result of anthropogenic eutrophication. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;8:20–30. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1718

Sabylina A. V., Efremova T. A. Features of chemical composition, transformation, and circulation of matter in the eutrophic Lake Kroshnozero, Republic of Karelia. *Water Resources*. 2025;52:966–976. doi: 10.1134/S0097807825601761

Sabylina A. V., Martynova N. N., Basov M. I. Reservoirs of the middle section of the Shuya River and Lake Vedlozero. *Sovremennoe sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1992–1997 gg. = Current state of water bodies in the Republic of Karelia. Based on the results of monitoring in 1992–1997*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1998. P. 139–145. (In Russ.)

Smirnova V. S., Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Chernova E. N. Phytoplankton state and cyanotoxins in the Lake Svyatozero bloom spot (Onega Lake basin, Russia). *Voda i ehkologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2021;1(85): 50–60. (In Russ.). doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60

Sterligova O. P., Kitaev S. P., Il'mast N. V., Komulainen S. F., Kuchko Ya. A., Pavlovsky S. A., Savosin E. S. Status of Onega Lake bays affected by commercial rainbow trout cultivation. *Povolzhskii ehkologicheskii zhurnal = Volga Region Ecological Journal*. 2011;3:386–393. (In Russ.)

Sukharevich V. I., Polyak Y. M. Global occurrence of cyanobacteria: causes and effects (review). *Inland Water Biology*. 2020;13(4):566–575. doi: 10.1134/S1995082920060140

Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Kravchenko I. Yu. Geochemical peculiarities of biota functioning in

water bodies of Karelia. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2018;1:90–100. (In Russ.). doi: 10.7868/S2587556618010083

Tikkanen T. Kasviplanktonopas. Suomen Luonnon-suojelun Tuki Oy. Helsinki: Forssa; 1986. 277 p.

Timakova T. M., Kalinina N. M., Lozovik P. A. The state of ecosystem of lake Lekshmozero after a mass fish kill. *Hydrobiol. J.* 2007;43(2):89–92. doi: 10.1615/HydrobJ.v43.i2.100

Voyakina E. Yu., Russkikh Ya. V., Chernova E. N., Zhakovskaya Z. A. Toxic cyanobacteria and their metabolites in the lakes of the Russian Northwest. *Teoreticheskaya i prikladnaya ehkologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2020;1:124–129. (In Russ.). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-124-129

Zabelina M. M., Kiselev I. A., Proshkina-Lavrenko A. I., Sheshukova V. S. Diatoms. An identification guide to freshwater algae of the USSR. Moscow: Sovetskaya nauka; 1951. 620 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 27.02.2026; принята к публикации / accepted: 18.05.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Калинкина Наталья Михайловна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: cerioda@mail.ru

Ефремова Татьяна Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Сластина Юлия Леонидовна

младший научный сотрудник

e-mail: jls@inbox.ru

Кравченкова Татьяна Георгиевна

начальник Карельского ЦГМС

e-mail: gidromet@onego.ru

Здоровеннов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Ефремова Татьяна Алексеевна

младший научный сотрудник

e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Здоровеннова Галина Эдуардовна

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: zdorovennova@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Kalinkina, Natalia

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Efremova, Tatiana

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Slastina, Yulia

Junior Researcher

Kravchenkova, Tatyana

Head of the Karelian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Efremova, Tatyana

Junior Researcher

Zdorovennova, Galina

Cand. Sci. (Geog.), Leading Researcher

УДК 574.523-.524+574.622

ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ СИГОВЫХ И ОКУНЕВЫХ РЫБ СЕВЕРНЫХ ОЗЕР

Н. А. Березина^{1*}, П. М. Терентьев², Е. М. Зубова²

¹ Зоологический институт РАН (Университетская наб., 1, Санкт-Петербург, Россия, 199034), *nadezhda.berezina@zin.ru

² Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН» (ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209)

В субарктических озерах Имандра, Куэтсьярви и Кривое исследованы пищевые спектры и трофические позиции основных видов рыб. Для этого использовались два метода: анализ содержимого желудка (SCA) и анализ стабильных изотопов (SIA). По результатам анализа стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) установлено, что ряпушка (*Coregonus albula*) в большей степени питается пелагическими организмами (величина $\delta^{13}\text{C}$ от -27 до -25 ‰); окунь (*Perca fluviatilis*), сиг (*Coregonus lavaretus*, крупная малотычинковая форма), ерш (*Gymnocephalus cernua*) и другие виды рыб, напротив, больше зависят от бентосных и литоральных источников (их $\delta^{13}\text{C}$ ближе к -24 ‰). Самые высокие средние значения азота ($\delta^{15}\text{N}$) обнаружены у налима исследованных озер (около 14 ‰), а также у корюшки и ерша (14–16 ‰) оз. Имандра. По пищевым предпочтениям окунь и сиг определены как виды-генералисты во всех водоемах. Кроме того, их трофические позиции были схожими в случае оз. Имандра. Сходство их рационов (по индексу Мориситы – Хорна) составило 42–49 % в сосуществующих популяциях озер, что может говорить об умеренном сходстве их рационов, свидетельствующем об использовании одних и тех же ресурсов, но пищевая конкуренция пока не является критичной для этих видов. Водно-воздушные насекомые (в первую очередь ручейники Trichoptera) были наиболее часто встречающимися компонентами в питании обоих видов. Однако в будущем из-за потепления климата и расширения ареала окуня конкуренция между ним и сиговыми может усилиться и стать одной из причин снижения численности сига в северных регионах.

Ключевые слова: трофические связи; рацион; пищевая конкуренция рыб; изотопный анализ; содержимое пищеварительных трактов

Для цитирования: Березина Н. А., Терентьев П. М., Зубова Е. М. Трофические связи сиговых и окуневых рыб северных озер // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 126–138. doi: 10.17076/lim2365

Финансирование. Исследование профинансировано Министерством науки и образования РФ в рамках государственных заданий № 125012800888-5 (Н. А. Березина), 1024081300010-8 (П. М. Терентьев) и 124020100060-8 (Е. М. Зубова).

N. A. Berezina^{1*}, P. M. Terentjev², E. M. Zubova². TROPHIC RELATIONSHIPS OF COREGONID AND PERCID FISHES IN NORTHERN LAKES

¹ Zoological Institute, Russian Academy of Sciences (1 Universitetskaya Emb., 199034 St. Petersburg, Russia), *nadezhda.berezina@zin.ru

² Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14 Fersmana St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)

The food spectra and trophic positions of the main fish species were studied in the sub-arctic lakes Imandra, Kuetsjarvi and Krivoe. Two methods were used: stomach contents analysis and stable isotope analysis. The analysis of stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) showed that vendace (*Coregonus albula*) primarily consumed pelagic organisms ($\delta^{13}\text{C}$ values from -27 to -25 ‰), while European perch (*Perca fluviatilis*), European whitefish (*Coregonus lavaretus*, large sparsely rakered form), ruffe (*Gymnocephalus cernua*) and others were more dependent on benthic and littoral sources (their $\delta^{13}\text{C}$ was near -24 ‰). The highest average nitrogen values ($\delta^{15}\text{N}$) were found in burbot from lakes of the Murmansk Region (about 14 ‰), as well as in smelt and ruffe (14 – 16 ‰) in Lake Imandra. In terms of their food preferences, perch and whitefish in all reservoirs were generalists. In addition, their trophic positions in Lake Imandra were similar. The similarity of their diets (measured by the Morisita-Horn index) was 42 – 49 % in coinhabitant populations, interpreted as moderate similarity, indicating the use of the same resources, but with competition for food not yet critical for these species. Aquatic and aerial insects (primarily Trichoptera) were the most common components in the diet of both species. However, the possible future range expansion by perch due to climate warming may escalate competition with whitefish, entailing a decline in whitefish numbers in the northern regions.

Keywords: trophic relationships; diet; competition for food; isotope analysis; stomach and gut content

For citation: Berezina N. A., Terentjev P. M., Zubova E. M. Trophic relationships of coregonid and percid fishes in northern lakes. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 126–138. doi: 10.17076/lim2365

Funding. This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under state assignments No. 125012800888-5 (N. A. Berezina), 1024081300010-8 (P. M. Terentjev), and 124020100060-8 (E. M. Zubova).

Введение

Арктика нагревается быстрее, чем остальная планета, из-за явления «полярного усиления» [Филатов и др., 2012]. Для глобального потепления и связанных с ним явлений, таких как повышение температуры воды, количество осадков и объем стока органических веществ с водосбора (включая гумификацию вод), оказались наиболее уязвимы экосистемы субарктических озер, в том числе пострадали популяции холодолюбивых рыб [Reist et al., 2006]. Сиговые виды рыб в арктических и субарктических водоемах дают основную долю суммарной ихтиопродукции [Решетников, 1980]. Текущее повышение температуры воды зачастую ведет к ее значениям в водоемах, выходящим за пределы оптимального диапазона для сиговых рыб, что может повлечь локальное сокращение их популяций [Hayden et al., 2015; Smalas et al., 2023]. В Обь-Иртышском бассейне с потеплением климата существенно улучшились условия обитания частиковых рыб, что привело

к увеличению численности этой группы рыб и обострению конкурентных взаимоотношений с симами [Матковский, 2019]. В Северо-Западном регионе окуневые виды рыб расширяют ареал, распространяясь на север, увеличивая свою численность во многих водоемах [Георгиев, 2014]. В озерах Карелии речной окунь – один из самых распространенных видов рыб [Стерлигова и др., 2016], в Мурманской области он до недавнего времени был достаточно редок [Smalas et al., 2023]. В реальности в озерах этого региона происходит процесс реорганизации ихтиоценозов, известный как «бореализация» [von Biela et al., 2023], при котором сиговые виды рыб постепенно заменяются видами преимущественно бореального распространения (в том числе окуневыми) в ответ на потепление климата. В составе уловов начинают доминировать карповые рыбы, увеличивается доля налима и окуня. Кроме этого, численность сиговых рыб повсеместно сокращается из-за техногенной нагрузки и нелегального вылова [Новоселов, Лукин, 2013].

В таких условиях важно изучить трофические взаимодействия окуневых и сиговых рыб, чтобы понять, в какой степени перекрываются их трофические ниши и насколько высока пищевая конкуренция между ними. Сиг является видом, чувствительным к повышению температуры воды, и его популяции уже демонстрируют признаки сокращения в северных регионах [Георгиев, Назарова, 2012], поэтому усиление конкуренции с более адаптивным окунем может быть одной из причин уменьшения численности популяций сиговых рыб в субарктических водоемах. В предыдущих работах выявлены значительное пересечение трофических ниш и сильная ресурсная пищевая конкуренция между сигами и окунем за пищу в некоторых водоемах Карелии и Мурманской области [Лесонен и др., 2017; Berezina et al., 2025].

В рамках данной работы проведено сравнительное исследование структуры трофической сети и спектров питания окуневых и сиговых рыб в субарктических озерах (Кривое, Куэтсъярви и Имандра). Для решения поставленных задач использованы в комплексе два метода – анализ пищевых трактов рыб и стабильных изотопов углерода и азота в тканях рыб и их потенциальных пищевых объектов. На основе данных состава пищевого комка рыб рассчитан индекс общности пищевых спектров, а по данным изотопного анализа определена позиция рыб в трофической сети озер.

Материалы и методы

Изученные озера

Озеро Кривое – небольшой водоем (0,7 км²) ледникового происхождения с максимальной глубиной 32 м (средняя глубина 9 м). Оно расположено в Северной Карелии, в 30 км ниже полярного круга, в бассейне Белого моря (рис. 1). По уровню общего фосфора (12–20 мг/м³) и хлорофилла *a* (0,2–3,0 мг/м³) в воде относится к олиготрофным водоемам, прозрачность воды составляет 4,5–6 м [Berezina et al., 2024]. Из рыб в озере встречается окунь *Perca fluviatilis* L., 1758, ряпушка *Coregonus albula* (L., 1758) (три формы: мелкая, обычная и крупная) и девятииглая колюшка *Pungitius pungitius* (L., 1758). Ранее также обитал сиг *Coregonus lavaretus* (L., 1758), в последний раз самка сига выловлена в августе 2003 г.

Озеро Имандра – крупнейшее озеро Мурманской области, расположено в западной части Кольского полуострова. Оно состоит из трех отдельных плесов (частей), связанных проливами: Большая Имандра (327,5 км², максимальная глубина 67 м), Йокостровская Имандра (361,9 км², 42 м) и Бабинская Имандра (191 км², 43,5 м). Северная часть Большой Имандры находится в эвтрофно-мезотрофном и наиболее загрязненном состоянии, что обусловлено влиянием предприятий горнопромышленной

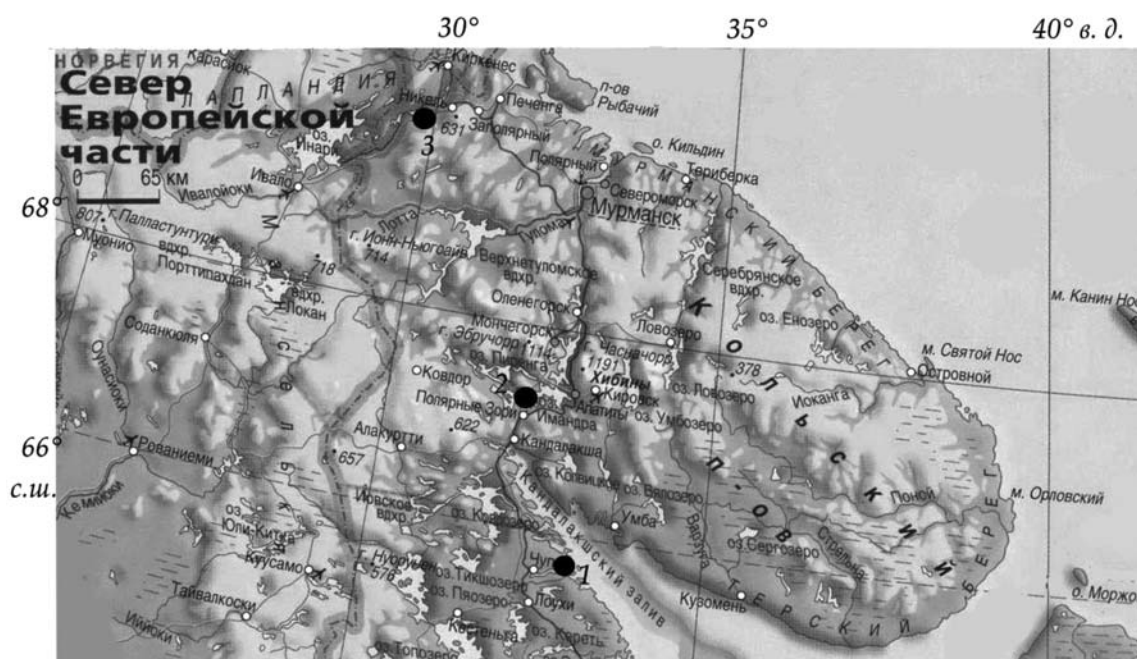


Рис. 1. Расположение изученных озер: 1 – оз. Кривое, 2 – оз. Имандра, 3 – оз. Куэтсъярви

Fig. 1. Location of the studied lakes: 1 – Lake Krivoje, 2 – Lake Imandra, 3 – Lake Kuetsjarvi

и металлургической отрасли, бытовыми сточными водами городов Мончегорск, Кировск и Апатиты. В данном исследовании мы сосредоточили внимание на остальных двух плесах озера (Йокостровской и Бабинской Имандре), где антропогенное загрязнение не так заметно. В этих районах Имандры доминирующими в уловах видами были окунь *P. fluviatilis*, сиг *C. lavaretus* и ерш *Gymnocephalus cernua* (L., 1758), на долю которых вместе приходилось до 90 % улова. Сиг был представлен в основном одной крупной формой с редкими жаберными тычинками числом от 16 до 27 (то есть малотычинковой). Более редки ряпушка, щука *Esox lucius* L., 1758, налим *Lota lota* (L., 1758), язь *Leuciscus idus* (L., 1758), кумжа *Salmo trutta* L., 1758, хариус *Thymallus thymallus* (L., 1758).

Озеро Куэтсъярви (площадь 17 км², максимальная глубина 37 м) расположено в Мурманской области, в северо-западной части Кольского полуострова (2–3 км от российско-норвежской границы). Оно относится к бассейну Баренцева моря. Оз. Куэтсъярви входит в придаточную систему р. Шуонийоки, впадающей в нижнее течение р. Пасвик, и является одним из наиболее загрязненных тяжелыми металлами природных водоемов Евро-Арктического региона из-за деятельности расположенных на его берегах плавильных цехов металлургического комбината «Печенганикель» [Кашулин и др., 2013]. В озере отмечено повышенное содержание меди и никеля из-за прошлых сбросов плавильного цеха медно-никелевого концентрата в пос. Никель (закрыт в 2020 г.).

Наибольшая концентрация общего фосфора в озере в летний период достигает 60 мкг/л, а общего азота – 390 мкг/л [Зубова и др., 2019]. Описано 9 видов рыб: сиг *C. lavaretus*, окунь, ряпушка, кумжа, хариус, щука, налим, голянь *Phoxinus phoxinus* L., 1758 и девятииглая колюшка [Зубова и др., 2019]. Сиг оз. Куэтсъярви представлен двумя основными формами: малотычинковой, обитающей преимущественно в мелководной и профундальной зонах, и среднетычинковой, обитающей в мелководной зоне и пелагиали [Решетников и др., 1999; Зубова и др., 2019]. Наиболее многочисленной является малотычинковая форма. Ранее в оз. Куэтсъярви был описан сиг, нерестящийся на первом-втором году жизни при длине 7–9 см [Лукин, Кашулин, 1991]. В последние годы доля сигов в уловах снизилась, а доля окуня, напротив, возросла [Зубова и др., 2019].

Методы отбора и обработки проб

Исследование рыб проводили в августе и сентябре 2019–2024 гг. Рыбу отлавливали стан-

дартными наборами ставных жаберных сетей из монофиламента. Использовались сети длиной 30 м, высотой 1,5 м и размером ячеи 10–60 мм. Отлов осуществляли в каждом озере на двух-трех станциях, расположенных в мелководной части озер (глубины от 3 до 18 м), что обеспечивало вылов рыбы длиной ≥ 8 см. Всего на анализ питания было собрано 248 экз. окуня (общей длиной тела 11–32,4 см), 82 сига (17,2–36 см), 68 экз. ряпушки (9–21 см) и 21 экз. ерша (9,2–12 см). Остальные рыбы, встреченные в уловах в небольшом количестве, взяты только для анализа стабильных изотопов (не менее трех для каждой станции). Обработку рыб проводили по стандартной методике [Правдин, 1966; Сандимиров и др., 2019]. Массу рыб определяли с точностью до 1 г. Общую длину (AB), длину по Смиту (AC) и промысловую длину рыб (AD) измеряли с точностью до 1 мм. После измерений и взвешивания тела рыб желудок удаляли из полости тела, его содержимое сразу анализировали под микроскопом. Наполненность желудка оценивалась по пятибалльной шкале. Анализировали только желудки с наполнением > 60 % (наполненность III–V). Содержимое желудка взвешивали, затем переносили в чашку Петри, все пищевые компоненты были разделены по таксономическим группам и идентифицированы (до рода или вида по возможности). Массовую долю (%) компонентов в пищевом комке определяли волюметрическим методом [Hyslop, 1980].

Общность пищевых спектров окуня и сигов оценивали по массовой доле i -го пищевого компонента у обоих видов с помощью расчета индекса Мориситы – Хорна [Horn, 1966]. Данный индекс принимает значения в интервале от 0 до 1. Равенство нулю означает отсутствие совпадений, единица – это полное перекрывание ниш. Значение индекса $> 0,6$ биологически означало перекрывание пищевых спектров [Wallace, 1981].

Анализ стабильных изотопов азота ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) в мышцах рыб проводили для определения места видов в пищевой сети, а углерода ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) – для понимания источников питания рыб (пелагические или бентические). Кроме того, эти же стабильные изотопы определяли в тканях потенциальных пищевых объектов рыб. Образцы тканей у отловленных организмов немедленно брали в пробирки и замораживали при -20 °C, затем в лаборатории их высушивали 48 ч в термостате при температуре 60 °C. Образцы хранили при -20 °C до момента анализа стабильных изотопов.

Измерения стабильных изотопов проводили в непрерывном потоке на масс-спектрометре изотопного соотношения Thermo Finnigan

Delta V Plus (США) и элементном анализаторе Thermo Scientific Flash EA 1112 (США) в лаборатории Института экологии и эволюции им. А. Н. Северцова (Москва, Россия) по ранее описанному методу [Berezina et al., 2025]. Навески тканей (~300 мкг) заворачивали в оловянную фольгу и взвешивали на весах Mettler Toledo MX5 (США). В качестве потребителей первого порядка (базовых) были выбраны личинки хирономид с минимальными значениями изотопов азота ($\delta^{15}\text{N}_b$). Трофическую позицию рыб (ТР) определяли по формуле: $\text{ТР}_c = (\delta^{15}\text{N}_c - \delta^{15}\text{N}_b) / \Delta^{15}\text{N} + \text{ТР}_b$, где $\delta^{15}\text{N}_c$ – изотопный состав азота потребителя; $\Delta^{15}\text{N} = 3,4\text{‰}$ – константа трофического обогащения и $\delta^{15}\text{N}_b$ – величина базового потребителя [Post, 2002].

Результаты и обсуждение

Анализ состава пищевого комка

Анализ спектров питания рыб в изученных озерах приведен в табл. 1. В летне-осенний период в озерах Имандра и Куэтсъярви в питании окуня (в возрасте 3–9 лет) доминировали рыбы (20–26 %) – ряпушка и колюшка, иногда ерш. В отличие от них в оз. Кривое окунь был скорее бентосоядным, а рыбы в его рационе составляли немногим более 10 %. В питании кривоозерского окуня доминировали амфиподы *Gammarus*, *Monoporeia* и *Gammaracanthus*, составляя вместе 63,5 % по массе. Из остальных представителей отмечены личинки хирономид *Sergentia* и личинки ручейников рода *Limnephilus* и *Phryganea*, поденок *Ephemera* и моллюски *Lymnaeidae* и *Sphaeriidae*. Зоопланктонные организмы (кладоцеры *Sida*, *Bosmina* и *Ceriodaphnia* и копеподы *Megacyclops* и *Cyclops*) составляли около 5 %. Гораздо большее значение имели планктонные рачки (крупные кладоцеры *Bythotrephes* и *Eurycerus* и копеподы *Acanthocyclops*) в питании окуня в озерах Имандра и Куэтсъярви. Личинки и куколки ручейников (*Phryganea*) были вторым по значимости источником пищи для окуня. Также обнаруживали мизид (*Mysis*), амфипод, хирономид и брюхоногих моллюсков. Для сравнения, основа питания окуня в Выгозерском водохранилище была сходной: крупные кладоцеры родов *Bythotrephes* и *Polyphemus*, а также другие ракообразные [Березина и др., 2013]. Из бентосных беспозвоночных окуни потребляли личинок и куколок ручейников.

У окуня из всех водоемов наблюдали характерное возрастное изменение состава рациона: переход от бентосоядного к рыбающему способу питания [Terentjev, Berezina, 2022].

Как правило, окунь длиной тела до 19 см в возрасте от 2 до 4 лет питался бентосными беспозвоночными. Рыба появилась в рационе окуня возраста 3+, когда его длина достигала 19 см, но даже при общей длине до 30 см примерно 40 % особей окуня в популяции изученных озер продолжали питаться донными беспозвоночными. Большинство же особей размером тела > 20 см питались рыбой (ряпушкой, колюшкой, ершом и молодь сеголеток). В других озерах Карелии основу питания взрослого окуня составляли ряпушка и корюшка, в меньшей степени – ерш, плотва и укля, а молодь сига, мелкий налим и колюшка были его редкой добычей [Стерлигова и др., 2016].

Во многих других водоемах основу питания окуня в возрасте 2+ и 3+ (при общей длине тела 7–14 см) составляют бентосные организмы, а к хищному питанию окунь переходит, достигая размеров 15 см [Попова, Ассман, 1993]. В малых озерах Финляндии при длине тела 10 см он становился бентосоядным, а достигая 15 см длины – рыбающим хищником [Naakana et al., 2007]. Кривоозерские окуни и окуни кольских озер в основной массе превосходили этот типичный для окуня «порог перехода» (то есть при длине 10–15 см) от бентосоядности к рыбаемости. В пределах одного водоема окунь может быть представлен двумя формами – медленно- и быстрорастущей, различающимися по темпу роста, поведению и характеру питания и месту обитания (прибрежный и глубоководный) [Дгебуадзе, 2001]. В уловах изученных озер в основном попадались прибрежные формы.

Сиги в оз. Имандра по питанию более приурочены к бентосу, потребляя широкий спектр донных организмов. В питании крупного малотычинкового сига доминировали амфиподы (*Monoporeia*) и моллюски (в основном *Sphaeriidae* и *Lymnaeidae*). Намечалась тенденция смены доминантов в питании сига с увеличением размера тела. В пище мелких сеголеток (менее 20 см) отмечены и планктонные организмы – крупные кладоцеры (*Bythotrephes*, *Chydoridae*), а также бентосные амфиподы (*Monoporeia*) и личинки хирономид, но они отсутствовали в питании крупных сеголеток. Зоопланктон был более важен в питании сеголеток оз. Куэтсъярви (32 %), а крупные личинки хирономид (р. *Chironomus*) были вторым избираемым сеголетками пищевым объектом. Важную долю по массе в питании сеголеток играли водно-воздушные насекомые (табл. 1). По мере увеличения размера сига возрастала доля бентосных организмов в пище, в основном сига питались моллюсками и личинками ручейников (*Phryganea*). У экземпляров общей длиной > 30 см в желудках были

Таблица 1. Массовая доля (%) объектов питания в пищевом комке окуня, сига, ряпушки и ерша в озерах
Table 1. Proportion by mass (%) in the food bolus of the main prey items of perch, whitefish, vendace, and ruff in lakes

Пищевой объект Food item	Имандра (Imandra)		Куэтсъярви (Kuetsjarvi)		Кривое (Krivoe)	
	X	SE	X	SE	X	SE
<i>Perca fluviatilis</i>						
Зоопланктон Zooplankton	25,4	12,7	12,9	9,0	4,5	2,0
Амфиподы Amphipods	11,1	8,9	0	0	63,5	11,0
Моллюски Mollusks	3,6	0,9	12,0	8,1	7,5	5,1
Хирономиды (личинки) Chironomids (larvae)	6,7	5,1	7,0	6,4	3,1	1,9
Воздушные насекомые Aerial insects	1,0	0,9	13,8	3,7	3,0	1,1
Ручейники (личинки) Trichopterans (larvae)	35,0	13,5	15,2	10,2	4,1	2,0
Поденки (личинки) Ephemeropterans (larvae)	0	0	4,7	4,0	6,1	4,3
Колюшка Stickleback	5,6	5,1	4,1	1,2	3,3	0,3
Ряпушка Smelt	11,6	4,3	22,7	16,4	7,9	1,7
<i>Coregonus lavaretus</i>						
Зоопланктон Zooplankton	10,4	9,9	32,2	11,7	-	-
Амфиподы Amphipods	28,8	6,3	0	0	-	-
Моллюски Mollusks	29,7	17,1	21,3	9,2	-	-
Хирономиды (личинки) Chironomids (larvae)	5,3	2,5	30,2	8,0	-	-
Воздушные насекомые Aerial insects	20,8	12,6	8,4	3,9	-	-
Ручейники (личинки) Trichopterans (larvae)	0	0	3,7	3,2	-	-
Донные водоросли Benthic algae	5,0	4,0	4,2	3,1	-	-
<i>Coregonus albula</i>						
Зоопланктон Zooplankton	7,9	5,6	-	-	31,5	7,0
Амфиподы Amphipods	0,3	0,2	-	-	14,0	9,2
Моллюски Mollusks	3,8	2,8	-	-	15,5	5,1
Хирономиды (личинки) Chironomids (larvae)	7,3	5,2	-	-	8,0	3,2
Воздушные насекомые Aerial insects	59,7	12,6	100	-	8,0	0
Ручейники (личинки) Trichopterans (larvae)	20,2	12,2	-	-	23,0	11,5
<i>Gymnocephalus cernua</i>						
Амфиподы Amphipods	-	-	32,0	15,2	0	0
Хирономиды (личинки) Chironomids (larvae)	-	-	62,9	15,1	86,7	7,1
Воздушные насекомые Aerial insects	-	-	2,0	2,0	10,0	0
Ручейники (личинки) Trichopterans (larvae)	-	-	3,1	2,0	3,3	2,0

Примечание. Приведены среднее значение (X) и стандартная ошибка (SE).
Note. Mean (X) and standard error (SE) are provided.

обнаружены только представители этих двух групп. Мелкие моллюски семейства Sphaeriidae и брюхоногие моллюски (Lymnaeidae) часто отмечены в питании сига как в изученных озерах, так и в других водоемах [Журавлев, Кузменкин, 2013; Zubova et al., 2024]. Ранее в тех же районах озера в желудках некоторых сига (длиной 20–30 см) обнаружены колюшки, а икра рыбы найдена у 50 % сига [Zubova et al., 2024].

Водно-воздушные насекомые были основой питания ряпушки в озерах Имандра и Куэтсъярви. Личинки ручейников *Phryganea* (около 20 %) в равной степени отмечены у ряпушки из озер Имандра и Кривое. Планктонные (*Sida*, *Bosmina*) и донные ракообразные (*Gammarus*, *Monoporeia*) составляли около 60 % рациона ряпушки (длина тела до 10 см). В желудках ряпушки более крупных размеров из оз. Имандра (длина тела до 20 см) обнаружены крупные кладоцеры рода *Bythotrephes*, личинки и куколки хирономид, имаго ручейников, а также брюхоногие моллюски (*Valvata*) и двустворчатые моллюски (Sphaeriidae). В оз. Куэтсъярви в уловах представленность ряпушки была мала, что не позволило нам провести полный анализ ее спектра питания (табл. 1). Возможно, это связано с тем, что в бассейне указанного озера она относится к видам-интродуцентам [Liso et al., 2011]. Выловлено всего 5 экз. ряпушки 2+–3+ (АС 11–11,2 см), в желудках этих рыб обнаружены куколки хирономид р. *Stictochironomus*.

Использование ряпушкой таких донных организмов, как личинки и куколки хирономид, амфиподы и мизиды, в качестве основной пищи в летний и осенний период отмечено для озер северной Карелии и Мурманской области [Berezina et al., 2018; Zubova и др., 2020] и других озер [Scharf et al., 2008; Боровской, Новоселов, 2020;

Strelnikova, Berezina, 2021]. В устье р. Оби 100 % содержимого желудка ряпушки *C. sardinella* составляли амфиподы *M. affinis*, до 600 экз. на одну рыбу [Strelnikova, Berezina, 2021]. В озерах бассейна Онежского озера ряпушка питалась в основном планктонными ветвистоусыми ракообразными [Ilmast, Kuchko, 2023]. Переключение ряпушки с питания зоопланктоном на воздушных насекомых (и зообентос) в качестве основной пищи может рассматриваться как адаптивное пищевое поведение из-за слабого запаса крупного кормового зоопланктона.

Личинки хирономид (Chironomidae) были доминирующим (> 60 %) компонентом питания ерша во всех озерах (табл. 1), а также ерши в оз. Имандра потребляли амфипод р. *Monoporeia*. В меньшей степени отмечены крупные личинки и имаго поденок (*Ephemera*) и ручейников (*Phryganea*). Количество особей других видов рыб (корюшки, колюшки и налима) в уловах было недостаточным (табл. 2) для детального анализа рациона, но, по предварительной оценке, основу питания корюшки (длина тела 11–15 см) составляли кладоцеры *Bosmina*, имаго ручейников и рыба (ряпушка и колюшка). Девятиглая колюшка во всех озерах питалась в основном личинками хирономид. В желудках налима отмечена только ряпушка, до семи особей в каждом желудке, реже ерш.

Индекс Мориситы – Хорна (0,42–0,49) указывал на умеренное сходство пищевых спектров окуня и сига в озерах Имандра и Куэтсъярви, а также сига и ряпушки в оз. Имандра (табл. 2). Значение индекса между составом пищи сига и окуня было наибольшим в оз. Куэтсъярви (0,49), свидетельствуя о том, что эти виды используют одни и те же ресурсы, но конкуренция пока не является критической.

Таблица 2. Индекс Мориситы – Хорна, рассчитанный по составу объектов питания в пищевом комке, для рыб из популяций разных озер

Table 2. Morisita-Horn index, calculated based on the composition of food items in the food bolus, between fish from populations of different lakes

Вид Species	Сиг (И) Whitefish (I)	Сиг (К) Whitefish (K)	Ряпушка (Кр) Smelt (Kr)	Окунь (К) Perch (K)	Окунь (И) Perch (I)	Ерш (И) Ruff (I)
Окунь (И) Perch (I)	0,42	-	-	0,82	-	0,21
Окунь (К) Perch (K)	-	0,49	-	-	-	-
Окунь (Кр) Perch (Kr)	-	-	0,37	0,17	0,12	-
Ряпушка (И) Smelt (I)	0,47	-	0,40	-	-	-
Сиг (И) Whitefish (I)	-	0,36	-	-	-	0,37

Примечание. И – Имандра, К – Куэтсъярви, Кр – Кривое.

Note. I – Imandra, K – Kuetsjarvi, Kr – Krivoe.

Окунь активно может конкурировать с сигом за пищу, потребляя бентос и личинок насекомых. В изученных озерах рационы окуня и сига частично совпадают, оба вида потребляют личинок и имаго вылетающих ручейников и других водных насекомых, что усиливает пищевую конкуренцию [Berezina et al., 2025].

Очень высоким был уровень сходства пищевых рационов у окуня из озер Имандра и Куэтсъярви (индекс Мориситы – Хорна = 0,82), основу их питания составляли ручейники и ряпушка (табл. 1). В то же время индекс указывает на слабое сходство рациона (на 12–17 %) окуня из карельского озера Кривое и озер Мурманской области (табл. 2).

Уровень перекрытия ниш между другими рыбами – ершом и окунем, окунем и ряпушкой, ершом и сигом – был невысок (0,21–0,37), свидетельствуя о значительных отличиях в их спектрах питания и отсутствии заметной пищевой конкуренции. В субарктической системе р. Пасвик ранее отмечена конкуренция за планктон между сигом и ряпушкой, имеющими идентичный рацион [Bøhn, Amundsen, 2001]. В оз. Имандра пищевая конкуренция между сигом и ряпушкой умеренная (индекс Мориситы – Хорна = 0,47). В других водоемах (р. Уса) получены низкие значения индексов пищевого сходства и незначительное перекрытие рационов сига-пыжьяна и печорской ряпушки [Боровской, Новоселов, 2020]. Сиг питался в основном личинками хирономид, а ряпушка – имаго насекомых, вылетающими из водоема и роящимися у его поверхности, и в меньшей степени – личинками водных насекомых со дна [Боровской, Новоселов, 2020].

Изотопный анализ

Окунь в большей степени был связан с бентосными и литоральными источниками углерода, в то время как ряпушка – с пелагическими цепями, поэтому ее изотопный состав отличается более низкими значениями содержания углерода (рис. 2).

Значения $\delta^{13}\text{C}$ ряпушки варьировали от –27 до –25 ‰ и были ближе к источникам планктонного сообщества ($\delta^{13}\text{C} = -27$ ‰). По значениям $\delta^{13}\text{C}$ окунь показал наибольшую изменчивость в озерах Имандра и Куэтсъярви по сравнению с ряпушкой и колюшкой. Его величины $\delta^{13}\text{C}$, как и других рыб (колюшки, налима и ерша), тоже были ближе к перифитонной и литоральной пищевой цепи, чем у ряпушки. Сиги по значениям $\delta^{13}\text{C}$ близки к окуню, ершу и колюшке в оз. Имандра, а в оз. Куэтсъярви – к налиму и колюшке.

Интересно, что в озерах Кривое и Куэтсъярви величины $\delta^{15}\text{N}$ ряпушки и окуня находятся примерно в одной области, полностью перекрываясь и не показывая статистических различий. Тут несколько причин, связанных с особенностями пищевой стратегии и образа питания ряпушки и окуня в северных низкотрофных озерах, то есть значительного вклада зообентоса в длительный период. Как отмечено выше, окунь переходит к хищничеству на более поздних стадиях, чем в озерах умеренных широт, а ряпушка (типичный планктофаг) питается не планктонными, а воздушными насекомыми и бентосными организмами. В оз. Имандра отличия в трофической позиции ряпушки и окуня были статистически значимыми (рис. 3). Окунь и щука занимали сходные позиции в оз. Куэтсъярви.

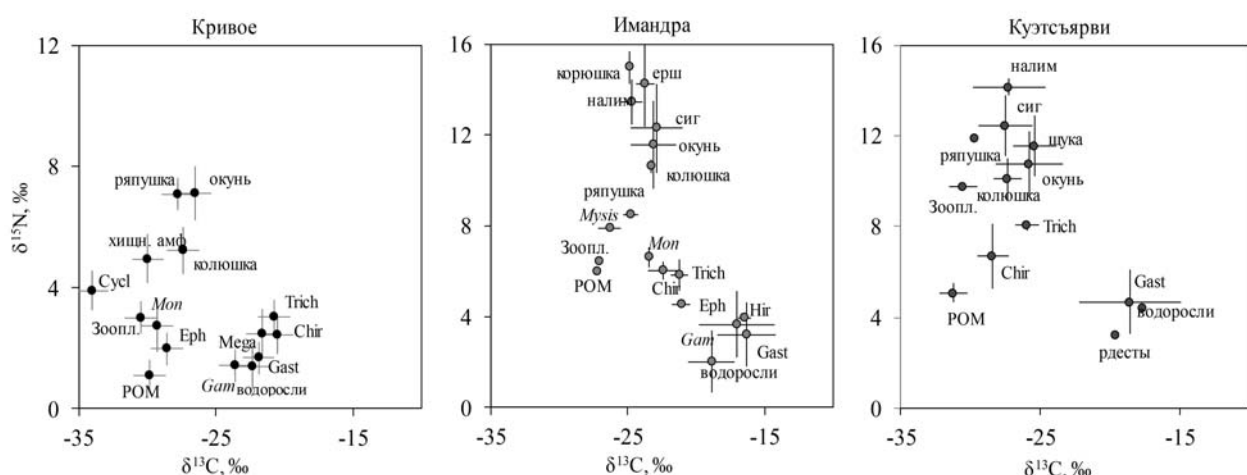


Рис. 2. Структура трофической сети в изученных озерах в конце августа – сентябре 2019–2024 гг.

Fig. 2. Food web structure in the studied lakes in late August–September of 2019–2024

К хищным амфиподам относится / Predatory amphipods include *Gammaracanthus*, Cyclop – Cyclopoida, Mon – Monoporeia, Eph – Ephemeroptera, Gam – Gammarus, Mega – Megaloptera, Trich – Trichoptera, Chir – Chironomidae, Gast – Gastropoda, Hir – Hirudinea, POM – сестон

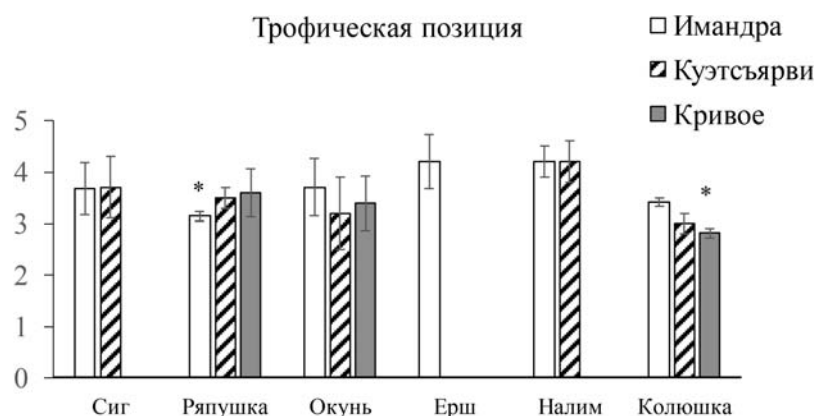


Рис. 3. Трофическая позиция рыб (окуня, ерша, сига и ряпушки) в изученных озерах

Fig. 3. Trophic position of fish such as perch, ruff, whitefish and vendace in the studied lakes

Несколько выше относительно остальных рыб была позиция ерша, однако из-за высокой дисперсии величин эти различия недостоверны ($p > 0,05$). Самую низкую по отношению к остальным видам трофическую позицию занимала колюшка, особенно в оз. Кривое (рис. 3). Трофические позиции сига и окуня во всех случаях сходны (3,4–3,7), они занимают позицию хищника 2-го порядка, то есть в их питании кроме зообентоса присутствуют мелкие рыбы (ряпушка) и их икра. Поедание икры характерно и для ерша и ряпушки [Решетников и др., 2020; Попов, 2023; Berezina et al., 2025].

В случае изученных озер мы не получили изотопных доказательств потребления сигом зоопланктона, хотя в желудках планктонные организмы встречались. Наше исследование сига относится к форме малотычинкового сига с редкими жаберными тычинками, которая, как отмечалось ранее, питается в основном зообентосом, в отличие, например, от формы с частыми жаберными тычинками (среднетычинкового сига), в рационе которого обычно преобладает зоопланктон [Amundsen et al., 2004]. Ряпушка частично питалась зообентосом и воздушными насекомыми (вылетающими имаго водных насекомых), компенсируя недостаток кормовых планктонных ракообразных.

Заключение

Использование комплексного подхода, включающего анализ состава пищевого комка в желудке рыб и применение метода стабильных изотопов, позволяет лучше понять организацию трофических связей в экосистемах северных озер. В ходе исследования обнаружено,

что все изученные виды рыб характеризуются высоким уровнем всеядности и смешанным характером питания. Отмечена высокая степень «бентосоядности» у всех изученных видов рыб. Даже такие типичные планктофаги, как ряпушка, потребляют бентос и воздушных насекомых. Однако, несмотря на то, что в желудках ряпушки отмечены преимущественно бентосные беспозвоночные, ее изотопный состав углерода наиболее близок к пелагическим источникам питания (зоопланктону), в отличие от других всеядных рыб, таких как окунь, ерш, налим и колюшка, которые имеют более тесные трофические связи с бентосной/литоральной пищевой цепью. Таким образом, широкие спектры питания рыб и высокую пищевую пластичность можно считать характерными чертами пищевых сетей изученных северных озер.

Авторы выражают признательность С. С. Сандимирову за помощь в отборе проб.

Литература

- Березина Н. А., Губелит Ю. И., Жакова Л. В., Ти макова Т. М., Петухов В. А., Шаров А. Н. Структурные характеристики биотических сообществ каменной литорали Выгозерского водохранилища // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 6. С. 52–62.
- Боровской А. В., Новоселов А. П. Пищевые отношения сиговых видов рыб в нижнем течении реки Уса в осенний период // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 5. С. 44–58. doi: 10.17076/eco1196
- Георгиев А. П. Значение рыб семейства окуневых (Percidae) Выгозерского водохранилища в рыбохозяйственном отношении // Научные дискуссии. Т. 1. 2014. С. 17–21.

- Георгиев А. П., Назарова Л. Е. Воздействие изменчивости климата Карелии на ихтиофауну озер Выгозеро и Водлозеро // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Мат-лы IV Всерос. науч. конф. Апатиты, 2012. С. 162–166.
- Дгебуадзе Ю. Ю. Экологические закономерности изменчивости роста рыб. М.: Наука, 2001. 276 с.
- Журавлев В. Б., Кузменкин Д. В. Роль пресноводных моллюсков в питании обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* (Linnaeus) оз. Сорулуколь (Горный Алтай) // Известия Алтайского государственного университета. 2013. № 3-2(79). С. 76–79. doi: 10.14258/izvasu(2013)3.2-15
- Зубова Е. М., Кашулин Н. А., Терентьев П. М. Биотическая симпатрия сига *Coregonus lavaretus* (L.) оз. Куэтсьярви (система р. Пасвик, Мурманская область) // Принципы экологии. 2019. № 2. С. 29–51.
- Зубова Е. М., Кашулин Н. А., Терентьев П. М. Современные биологические характеристики сига *Coregonus lavaretus*, европейской ряпушки *C. albula* и европейской корюшки *Osmerus eperlanus* озера Имандра // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2020. № 3. С. 210–226. doi: 10.17072/1994-9952-2020-3-210-226
- Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М., Кашулин А. Н. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2013. Т. 16, № 1. С. 98–107.
- Лесонен М. А., Горбач В. В., Шустов Ю. А. Пищевые взаимоотношения обыкновенного сига (*Coregonus lavaretus*) и речного окуня (*Perca fluviatilis*) в малом лесном озере // Принципы экологии. 2017. № 4. С. 37–45.
- Лукин А. А., Кашулин Н. А. Состояние ихтиофауны водоемов в приграничной зоне СССР и Норвегии. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1991. 50 с.
- Матковский А. К. Причины сокращения запасов полупроходных сиговых рыб Обь-Иртышского бассейна // Вестник рыбохозяйственной науки. 2019. Т. 6, № 1(21). С. 27–48.
- Новоселов А. П., Лукин А. А. Современное состояние сиговых рыб Европейского Северо-Востока России и разработка путей их рационального использования // Рыбное хозяйство. 2013. № 4. С. 16–21.
- Попов П. А. К экологии обыкновенного ерша из водоемов Сибири // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. № 4(71). С. 80–96. doi: 10.24412/2410-1192-2023-17106
- Попова О. А., Ассман А. В. Питание молоди окуня и ерша в прибрежной зоне Сямозера // Биология речного окуня. М.: Наука, 1993. С. 113–124.
- Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищ. пром., 1966. 376 с.
- Решетников Ю. С. Экология и систематика сиговых рыб. М.: Наука, 1980. 301 с.
- Решетников Ю. С., Попова О. А., Кашулин Н. А., Лукин А. А., Амудсен П.-А., Сталдвик Ф. Оценка благополучия рыбной части водного сообщества по результатам морфологического анализа рыб // Успехи современной биологии. 1999. № 2. С. 165–177.
- Решетников Ю. С., Стерлигова О. П., Аникиева Л. В., Королева И. М. Проявление необычных свойств у рыб в новой ситуации на примере ряпушки *Coregonus albula* и корюшки *Osmerus eperlanus* // Вопросы ихтиологии. 2020. Т. 60, № 3. С. 352–363. doi: 10.31857/S0042875220030182
- Сандимиров С. С., Кудрявцева Л. П., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Косова А. Л., Черепанов А. А., Вандыш О. И., Валькова С. А., Терентьев П. М., Королева И. М., Зубова Е. М., Кашулин Н. А. Методы экологических исследований водоемов Арктики. Мурманск: МГТУ, 2019. 180 с.
- Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Савосин Д. С. Окунь *Perca fluviatilis* (Percidae) разнотипных водоемов Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. № 2(155). С. 57–62.
- Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р., Ожигина В. В., Богдан М. И. Изменения и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 80–93.
- Amundsen P. A., Knudsen R., Klemetsen A., Kristoffersen R. Resource competition and interactive segregation between sympatric whitefish morphs // Ann. Zool. Fennici. 2004. Vol. 41. P. 301–307.
- Berezina N. A., Strelnikova A. P., Maximov A. A. The benthos as the basis of vendace *Coregonus albula* and perch *Perca fluviatilis* diet in an oligotrophic sub-Arctic lake // Polar Biol. 2018. Vol. 41. P. 1789–1799. doi: 10.1007/s00300-018-2319-0
- Berezina N. A., Terentjev P. M., Zubova E. M., Tsurikov S. M. Trophic relationships of coregonid and percid fishes evaluated by the stomach content and stable isotopes in subarctic Lake Imandra // Fishes. 2025. Vol. 10. Art. 644. doi: 10.3390/fishes10120644
- Bøhn T., Amundsen P. A. The competitive edge of an invading specialist // Ecology. 2001. Vol. 82. P. 2150–2163. doi: 10.1890/0012-9658(2001)082[2150:TCEO-AI]2.0.CO;2
- Haakana H., Huuskonen H., Karjalainen J. Predation of perch on vendace larvae: diet composition in an oligotrophic lake and digestion time of the larvae // J. Fish Biol. 2007. Vol. 70. P. 1171–1184. doi: 10.1111/j.1095-8649.2007.01383.x
- Hayden B., Harrod C., Sonninen E., Kahilainen K. Seasonal depletion of resources intensifies trophic interactions in subarctic freshwater fish communities // Freshwat. Biol. 2015. Vol. 60. P. 1000–1015. doi: 10.1111/fwb.12564
- Horn H. S. Measurement of “overlap” in comparative ecological studies // Amer. Natur. 1966. Vol. 100. P. 419–424. doi: 10.1086/282436
- Hyslop E. J. Stomach contents analysis – a review of methods and their application // J. Fish Biol. 1980. Vol. 17. P. 411–429. doi: 10.1111/J.1095-8649.1980.TB02775.X
- Ilmast N. V., Kuchko Y. A. Zooplankton and feeding of vendace introduced to Lake Vashozero, Lake Onega Basin // Russian Journal of Biological Invasion. 2023. Vol. 14. P. 1–7. doi: 10.1134/S207511723010034
- Liso S., Gjelland K. O., Reshetnikov Y. S., Amundsen P. A. A planktivorous specialist turns rapacious:

piscivory in invading vendace *Coregonus albula* // J. Fish Biol. 2011. Vol. 78(1). P. 332–337. doi: 10.1111/j.1095-8649.2010.02831.x

Post D. M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions // Ecology. 2002. Vol. 83. P. 703–718. doi: 10.1890/0012-9658(2002)083[0703:USITET]2.0.CO;2

Reist J. D., Wrona F. J., Prowse T. D., Power M., Dempson J. B., Beamish R. J., King J. R., Carmichael T. J., Sawatzky C. D. General effects of climate change on Arctic fishes and fish populations // AMBIO A J. Hum. Environ. 2006. Vol. 35. P. 370–380. doi: 10.1579/0044-7447(2006)35[370:GEOCCO]2.0.CO;2

Scharf J., Krappe M., Koschel R., Waterstraat A. Feeding of European cisco (*Coregonus albula* and *C. lucinensis*) on the glacial relict crustacean *Mysis relicta* in Lake Breiter Luzin (Germany) // Limnologica. 2008. Vol. 38. P. 147–158. doi: 10.1016/j.limno.2007.12.001

Smalas A., Primicerio R., Kahilainen K. K., Terent'ev P. M., Kashulin N. A., Zubova E. M., Amundsen P.-A. Increased importance of cool-water fish at high latitudes emerges from individual-level responses to warming // Ecol. Evol. 2023. Vol. 13. e10185. doi: 10.1002/ece3.10185

Strelnikova A. P., Berezina N. A. Diversity of food spectra of vendace in the water bodies of Eurasia // Ecosystem Transformation. 2021. Vol. 4. P. 42–56. doi: 10.23859/estr-210329

Terent'ev P. M., Berezina N. A. Ecological and morphological characteristics and feeding of perch (*Perca fluviatilis*) in the autumn–winter period in dystrophic and oligotrophic lakes of Northern Karelia (Russia) // Inland Water Biology. 2022. Vol. 15. P. 916–929. doi: 10.1134/S1995082922060177

von Biela V. R., Laske S. M., Stanek A. E., Brown R. J., Duntun K. H. Borealization of nearshore fishes on an interior Arctic shelf over multiple decades // Glob. Change Biol. 2023. Vol. 29. P. 1822–1838. doi: 10.1111/gcb.16576

Wallace R. K. An assessment of diet-overlap indexes // Trans. Am. Fish. Soc. 1981. Vol. 110. P. 2–76. doi: 10.1577/1548-8659(1981)110<72:AAODI>2.0.CO;2

Zubova E. M., Terent'ev P. M., Kashulin N. A., Bochkarev N. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Cherepanov A. A., Postnova S. V. European whitefish *Coregonus lavaretus* of the Nizhnetulomskoye Reservoir (Tuloma River basin, Murmansk Region) and its habitat conditions // Limnology and Freshwater Biology. 2024. Vol. 2. P. 58–97. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-2-58

References

Amundsen P. A., Knudsen R., Klemetsen A., Kristoffersen R. Resource competition and interactive segregation between sympatric whitefish morphs. *Ann. Zool. Fennici*. 2004;41:301–307.

Berezina N. A., Gubelit Yu. I., Zhakova L. V., Timakova T. M., Petukhov V. A., Sharov A. N. Structural characteristics of biotic communities of the Vygozerskoe Reservoir littoral zone. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2013;6:52–62. (In Russ.)

Berezina N. A., Strelnikova A. P., Maximov A. A. The benthos as the basis of vendace *Coregonus albula* and perch *Perca fluviatilis* diet in an oligotrophic sub-Arctic lake. *Polar Biol.* 2018;41:1789–1799. doi: 10.1007/s00300-018-2319-0

Berezina N. A., Terent'ev P. M., Zubova E. M., Tsurikov S. M. Trophic relationships of coregonid and percid fishes evaluated by the stomach content and stable isotopes in subarctic Lake Imandra. *Fishes*. 2025;10:644. doi: 10.3390/fishes10120644

Bøhn T., Amundsen P. A. The competitive edge of an invading specialist. *Ecology*. 2001;82:2150–2163. doi: 10.1890/0012-9658(2001)082[2150:TCEOAI]2.0.CO;2

Borovskoy A. V., Novoselov A. P. Food relations between whitefish species in the lower course of the Usa River in the autumn period. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;5:44–58. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1196

Dgebuadze Yu. Yu. Ecological patterns of fish growth variability. Moscow: Nauka; 2001. 276 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R., Ozhigina V. V., Bogdan M. I. Changes and variability of the climate of the European North of Russia and their impact on water bodies. *Arktika: ehkologiya i ehkonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2012;2(6):80–93. (In Russ.)

Georgiev A. P. The importance of fish of the perch family (Percidae) of the Vygozero Reservoir in fisheries. *Nauchnye diskussii = Scientific Discussions*. 2014;1:17–21. (In Russ.)

Georgiev A. P., Nazarova L. E. Impact of climate variability in Karelia on the ichthyofauna of Lakes Vygozero and Vodlozero. *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ikh resheniya: Mat-ly IV Vseros. nauch. konf. = Ecological problems of the Northern regions and ways of their solution: Proceed. of the IV All-Russ. scientific conf. Apatity*; 2012. P. 162–166. (In Russ.)

Haakana H., Huuskonen H., Karjalainen J. Predation of perch on vendace larvae: diet composition in an oligotrophic lake and digestion time of the larvae. *J. Fish Biol.* 2007;70:1171–1184. doi: 10.1111/j.1095-8649.2007.01383.x

Hayden B., Harrod C., Sonninen E., Kahilainen K. Seasonal depletion of resources intensifies trophic interactions in subarctic freshwater fish communities. *Freshwat. Biol.* 2015;60:1000–1015. doi: 10.1111/fwb.12564

Horn H. S. Measurement of “overlap” in comparative ecological studies. *Amer. Natur.* 1966;100:419–424. doi: 10.1086/282436

Hyslop E. J. Stomach contents analysis – a review of methods and their application. *J. Fish Biol.* 1980;17:411–429. doi: 10.1111/J.1095-8649.1980.TB02775.X

Ilmast N. V., Kuchko Y. A. Zooplankton and feeding of vendace introduced to Lake Vashozero, Lake Onega Basin. *Russian Journal of Biological Invasion*. 2023;14:1–7. doi: 10.1134/S2075111723010034

Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Denisov D. B., Val'kova S. A., Vandysh O. I., Terent'ev P. M., Kashulin A. N. Some aspects of current state of freshwater resources of the Murmansk Region. *Vestnik MGTU = Bulletin of Murmansk State Technical University*. 2013;16(1):98–107. (In Russ.)

- Lesonen M. A., Gorbach V. V., Shustov Yu. A. Food relationships of the common whitefish (*Coregonus lavaretus*) and river perch (*Perca fluviatilis*) in a small forest lake. *Printsipy ehkologii = Principles of Ecology*. 2017;4:37–45. (In Russ.)
- Liso S., Gjelland K. O., Reshetnikov Y. S., Amundsen P. A. A planktivorous specialist turns rapacious: piscivory in invading vendace *Coregonus albula*. *J. Fish Biol.* 2011;78:332–337. doi: 10.1111/j.1095-8649.2010.02831.x
- Lukin A. A., Kashulin N. A. State of the ichthyofauna of reservoirs in the border zone of the USSR and Norway. Apatity: KSC RAS; 1991. 50 p. (In Russ.)
- Matkovsky A. K. Causes of semidiadromous whitefish population reduction in the Ob-Irtysh basin. *Vestnik rybokhozyaistvennoi nauki = Bulletin of Fishery Science*. 2019;6(1-21):27–48. (In Russ.)
- Novoselov A. P., Lukin A. A. Current status of whitefish in the European northeast of Russia and development of ways for their rational use. *Rybnoe khozyaistvo = Fisheries*. 2013;4:16–21. (In Russ.)
- Popov P. A. On the ecology of the common ruff from Siberian water bodies. *Izvestiya Altaiskogo otdeleniya RGO = Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society*. 2023;4(71):80–96. (In Russ.). doi: 10.24412/2410-1192-2023-17106
- Popova O. A., Assman A. V. Feeding of juvenile perch and ruff in the coastal zone of Lake Syamozero. *Biologiya rechnogo okunya = Biology of River Perch*. Moscow: Nauka; 1993. P. 113–124. (In Russ.)
- Post D. M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*. 2002;83:703–718. doi: 10.1890/0012-9658(2002)083[0703:USITET]2.0.CO;2
- Pravdin I. F. Handbook of fish study. Moscow: Pishch. prom.; 1966. 376 p. (In Russ.)
- Reist J. D., Wrona F. J., Prowse T. D., Power M., Dempson J. B., Beamish R. J., King J. R., Carmichael T. J., Sawatzky C. D. General effects of climate change on Arctic fishes and fish populations. *AMBIO*. 2006;35:370–380. doi: 10.1579/0044-7447(2006)35[370:GEOCCO]2.0.CO;2
- Reshetnikov Yu. S. Ecology and taxonomy of whitefish. Moscow: Nauka; 1980. 301 p. (In Russ.)
- Reshetnikov Yu. S., Popova O. A., Kashulin N. A., Lukin A. A., Amundsen P.-A., Staldvik F. Assessment of the well-being of the fish part of the aquatic community based on the results of morphological analysis of fish. *Uspekhi sovremennoi biologii = Advances in Modern Biology*. 1999;2:165–177. (In Russ.)
- Reshetnikov Yu. S., Sterligova O. P., Anikieva L. V., Koroleva I. M. Manifestation of unusual features in fish exposed to a new environment by the example of vendace *Coregonus albula* and European smelt *Osmerus eperlanus*. *J. Ichthyol.* 2020;60(3):491–502. doi: 10.1134/S0032945220030145
- Sandimirov S. S., Kudryavtseva L. P., Dauval'ter V. A., Denisov D. B., Kosova A. L., Cherepanov A. A., Vandysh O. I., Val'kova S. A., Terent'ev P. M., Koroleva I. M., Zubova E. M., Kashulin N. A. Methods of environmental studies of Arctic water bodies. Murmansk: MGTU; 2019. 180 p. (In Russ.)
- Scharf J., Krappe M., Koschel R., Waterstraat A. Feeding of European cisco (*Coregonus albula* and *C. lucinensis*) on the glacial relict crustacean *Mysis relicta* in Lake Breiter Luzin (Germany). *Limnologia*. 2008;38:147–158. doi: 10.1016/j.limno.2007.12.001
- Smalas A., Primicerio R., Kahilainen K. K., Terentyev P. M., Kashulin N. A., Zubova E. M., Amundsen P.-A. Increased importance of cool-water fish at high latitudes emerges from individual-level responses to warming. *Ecol. Evol.* 2023;13:e10185. doi: 10.1002/ece3.10185
- Sterligova O. P., Il'mast N. V., Savosin D. S. Perch *Perca fluviatilis* (Percidae) in different types of Karelian water bodies. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gos. universiteta = Proceed. of Petrozavodsk State University*. 2016;2(155):57–62.
- Strelnikova A. P., Berezina N. A. Diversity of food spectra of vendace in the water bodies of Eurasia. *Ecosystem Transformation*. 2021;4:42–56. doi: 10.23859/estr-210329
- Terentyev P. M., Berezina N. A. Ecological and morphological characteristics and feeding of perch (*Perca fluviatilis*) in the autumn–winter period in dystrophic and oligotrophic lakes of Northern Karelia (Russia). *Inland Water Biology*. 2022;15:916–929 doi: 10.1134/S1995082922060177
- von Biela V. R., Laske S. M., Stanek A. E., Brown R. J., Dunton K. H. Borealization of nearshore fishes on an interior Arctic shelf over multiple decades. *Glob. Change Biol.* 2023;29:1822–1838. doi: 10.1111/gcb.16576
- Wallace R. K. An assessment of diet-overlap indexes. *Trans. Am. Fish. Soc.* 1981;110:2–76. doi: 10.1577/1548-8659(1981)110<72:AAODI>2.0.CO;2
- Zhuravlev V. B., Kuzmenkin D. V. The role of freshwater mollusks in feeding of humpback whitefish *Coregonus lavaretus* (Linnaeus) in Lake Sorulukol (Mountain Altai). *Izvestiya Altaiskogo gos. universiteta = Bulletin of Altai State University*. 2013;3-2(79):76–79. (In Russ.). doi: 10.14258/izvasu(2013)3.2-15
- Zubova E. M., Kashulin N. A., Terentyev P. M. Biotic sympatry of whitefish *Coregonus lavaretus* (L.) in Lake Kuetsjarvi (Pasvik River system, Murmansk Region). *Printsipy ehkologii = Principles of Ecology*. 2019;2:29–51. (In Russ.)
- Zubova E. M., Kashulin N. A., Terentyev P. M. Modern biological characteristics of whitefish *Coregonus lavaretus*, European vendace *C. albula*, and European smelt *Osmerus eperlanus* from Lake Imandra. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser. Biologiya = Bulletin of Perm University. Biology Series*. 2020;3:210–226. (In Russ.). doi: 10.17072/1994-9952-2020-3-210-226
- Zubova E. M., Terentyev P. M., Kashulin N. A., Bochkarev N. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Cherepanov A. A., Postnova S. V. European whitefish *Coregonus lavaretus* of the Nizhnetulomskoye Reservoir (Tuloma River basin, Murmansk Region) and its habitat conditions. *Limnology and Freshwater Biology*. 2024;2: 58–97. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-2-58

Поступила в редакцию / received: 08.04.2026; принята к публикации / accepted: 19.06.2026.
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Березина Надежда Александровна

канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: nadezhda.berezina@zin.ru

Терентьев Петр Михайлович

канд. биол. наук, заведующий лабораторией
водных экосистем

e-mail: p.terentjev@ksc.ru

Зубова Елена Михайловна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: seelewolf84@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Berezina, Nadezhda

Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Terentjev, Pyotr

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

Zubova, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

УДК 574.455(504.455)

СТРУКТУРА И ИНДИКАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФИТОПЕРИФИТОНА ОЗЕРА ИМАНДРА (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

С. Ф. Комулайнен

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

Приведены результаты исследования водорослей фитоперифитона озера Имандра (Мурманская область). Определен видовой состав, рассмотрены структурные особенности сообществ, получены количественные характеристики. В фитоперифитоне определено 114 видов водорослей, принадлежащих к 7 отделам, 46 семействам, 79 родам. Преобладают Bacillariophyta (55,3 % общего числа видов), Chlorophyta (26 %) и Cyanophyta (8 %). Доля остальных отделов в сумме не превышает 4 % от общего числа видов. Установлено, что состав ведущих семейств и флористические спектры фитоперифитона зависят от гидрологических условий на станциях исследуемого участка. Численность водорослей перифитона на исследованных участках изменялась от 195,2 до 13 010,2 10^3 кл./см², а биомасса – от 6,8 до 202,7 мг/см². Основу численности на большинстве исследованных участков формируют диатомовые водоросли, а основу биомассы – зеленые и диатомовые водоросли. К доминирующим отнесены 14 видов (12,3 %), из которых 7 преобладают по численности, а 12 по биомассе, формируя от 35 до 74 % от суммарной численности и от 48 до 81 % от суммарной биомассы. По географическому распространению доминируют космополиты, по отношению к солености – индифференты, по отношению к pH среды – индифференты и алкалофилы, по местообитанию – бентосные виды. Показатели сапробности, согласно методам Ватанабе и Сладечека, показывают умеренный уровень органического загрязнения. В целом распределение каждой группы показателей коррелирует с измеряемыми физико-химическими переменными.

Ключевые слова: фитоперифитон; численность; биомасса; экология; озеро Имандра

Для цитирования: Комулайнен С. Ф. Структура и индикационные возможности фитоперифитона озера Имандра (Мурманская область) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 139–148. doi: 10.17076/lim2380

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2022-0007).

S. F. Komulaynen. STRUCTURE AND INDICATOR CAPABILITIES OF PHYTOPERIPHYTON IN LAKE IMANDRA, MURMANSK REGION

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

The article presents the results of a study of periphytic algae in Lake Imandra, Murmansk Region, including information on the species composition, structural features of communities, and quantitative characteristics. The phytoepiphyton comprises 114 species of algae belonging to 7 divisions, 46 families, and 79 genera. Bacillariophyta (55.3 % of the total number of species), Chlorophyta (13.2 %), and Cyanophyta (22.8 %) predominate. The rest of the divisions collectively account for not more than 4% of the total number of species. The composition of the leading families and the floral spectra of the phytoepiphyton were found to depend on the site-specific hydrological conditions. The abundance of periphytic algae in the studied sites varied from 195.2 to 13 010.2 10^3 cells/cm², and the biomass from 6.8 to 202.7 mg/cm². Diatoms form the bulk of both the abundance in most of the studied sites, while biomass is mainly generated by green algae and diatoms. Fourteen species (12.3 %) are classified as dominants, 7 of them dominating in abundance and 12 in biomass, and accounting for 35 to 74 % of the total abundance and for 48 to 81 % of the total biomass. The following groups dominate: in terms of geographic extent – cosmopolites, in relation to salinity – indifferent species, in relation to pH – indifferent and alkaliphilic species, and in relation to habitats – benthic species. Saprobity, based on metrics suggested by Watanabe and Sládeček, is indicative of a moderate level of organic pollution. Overall, these indicators adequately reflect the distribution of algal communities over the river habitats. We found that the distribution of each group of indicators aligns with the measured physico-chemical variables.

Keywords: attached algae; abundance; biomass; ecology; Lake Imandra

For citation: Komulaynen S. F. Structure and indicator capabilities of phytoepiphyton in Lake Imandra, Murmansk Region. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 139–148. doi: 10.17076/lim2380

Funding. Financial support for the research was provided from the federal budget for the implementation of state assignment to KarRC RAS (FMEN-2022-0007).

Введение

Озера как источник водоснабжения и энергии, объекты рекреации, рыболовства и рыбноводства занимают важное место среди природных ресурсов Мурманской области. В то же время они очень уязвимы, интегрируя изменения, связанные с увеличением антропогенной нагрузки. Их рациональное использование и минимизация негативного воздействия промышленного освоения водосбора невозможно без знаний закономерностей функционирования экосистемы водоемов. Такие знания требуют изучения структуры отдельных компонентов экосистемы и характера их взаимодействия.

Лимнологические исследования в регионе, включающие и анализ их альгофлоры, были начаты еще в XIX веке [Komulaynen, 2007]. Они активизировались в конце XX в., когда вблизи промышленных центров возникли зоны экологического неблагополучия. Примером многолетнего комплексного исследования стало оз. Иmandра. Альгологические исследования здесь в основном были сфокусированы на

водорослях планктона [Шаров, 2004; Денисов, Кашулин, 2013] и диатомеях донных отложений [Вокуева, Денисов, 2022]. В то же время анализу структуры фитоперифитона уделялось относительно мало внимания, хотя в ряде работ [Денисов и др., 2016] отмечено его таксономическое разнообразие. Причем известно, что группировки водорослей обрастаний служат чувствительным биоиндикатором изменений окружающей среды и вносят значительный вклад в общую продукцию автотрофов [Wetzel, 1979].

Целью настоящей работы являлся анализ таксономического состава, обилия и экологии фитоперифитона (эпилитона), формирующегося в литоральной зоне озера. Полученные данные необходимы для оценки современного состояния озера и для разработки программы экологического мониторинга.

Материалы и методы

Озеро Иmandра (67°21'–68°04' с. ш. и 31°52'–33°27' в. д.) – самый крупный водоем на Кольском полуострове. Длина озера 109 км,

средняя ширина 3,19 км, площадь 880,4 км², а площадь водосбора 12 300 км². Водоем разделен узкими протоками на три достаточно самостоятельных плеса – Большую, Экостровскую и Бабинскую Имандру. Географическое положение озера, сложная форма и режим питающих рек до начала индустриализации региона определяли его гидрохимический режим, типичный для субарктических водоемов Кольского полуострова.

С 30-х годов XX века озеро Имандра начало испытывать многофакторное антропогенное воздействие. Это стало следствием формирования на водосборе мощного индустриального комплекса, включающего горнодобывающую, горнометаллургическую промышленность и железорудное производство. Кроме того, строительство на реке Нива, единственном стоке из озера, трех ГЭС превратило озеро в Имандро-Пиренгское водохранилище, что резко изменило режим внутренних течений и нарушило естественный ход колебаний уровня воды. После введения в строй в 1973 г. на перешейке, разделяющем Экостровскую и Бабинскую Имандру, Кольской АЭС в губу Молочная стала сбрасываться подогретая вода [Dauvalter et al., 2025].

Материалом для настоящего исследования послужили пробы, отобранные в период с 25 по 28 августа 2023 г. на литорали Экостровской (ЭИ) и Бабинской (БИ) Имандры (рис.). Первая характеризуется как мезотрофная, а вторая близка к олиготрофному статусу, хотя губа Молочная, куда сбрасываются подогретые воды, описывается как переходная к мезо-олиготрофному статусу [Терентьева и др., 2017].

В период отбора проб температура воды на исследованных участках изменялась от 15 до 22 °С. Причем ее максимальные значения отмечены не в зоне поступления подогретых вод (ст. 4, 5), а на станциях 12–15. Это можно объяснить доминированием в августе 2023 г. южных и юго-западных ветров (58 %). Прозрачность воды изменялась от 5 до 7 м, минерализация от 58 до 70 мг/л, а pH колебался в пределах 7,1–7,3.

Пробы отбирались на каменистой литорали, где отсутствовала высшая водная растительность. На каждом из 15 выбранных участков пробы перифитона отбирали с пяти камней площадью примерно 10×15 см. Таким образом, на каждой станции площадь, с которой отбирался материал, составила около 750 см². В дальнейшем пробы анализировались по отработанной методике [Комулайнен, 2024].

Камеральная обработка проб включала таксономическую идентификацию, подсчет численности и замер индивидуальных объемов клеток водорослей с помощью микроскопа Olympus CX41 с цифровой камерой Esra (D30-D3Cplus). Классификация таксонов водорослей приведена по схеме, принятой в *Süßwasserflora von Mitteleuropa* с уточнением названий некоторых видов согласно современным сводкам. Порядки и семейства расположены в списке по системе, принятой в использованных определителях, а роды и виды в родах – по алфавиту.

Биомассу водорослей вычисляли счетно-объемным методом на основе определения индивидуального объема клеток. Это позволило оценить роль отдельных таксонов в формировании биомассы фитоперифитона.



Карта-схема оз. Имандра и расположение станций отбора проб
Schematic map of Lake Imandra and the location of sampling stations

Для оценки роли отдельных таксонов в формировании группировок вычисляли также частоту встречаемости (pF, %), доминирования (DF, %) и среднее относительное обилие видов по численности (N, %) и биомассе (B, %). Виды с удельным относительным обилием $\geq 10\%$ в перифитоне на отдельных участках отнесены к доминирующим. Стабильность структуры группировок оценивали с использованием индексов видового разнообразия (Пантле – Букка) и доминирования (Симпсона), а сходство – по коэффициенту Серенсена.

Экологическая характеристика и географическая приуроченность приводятся в основном по данным из работы С. С. Бариновой с соавт. [2006] и дополнена сведениями из других работ. Качество вод и их трофность оценивали по методу Пантле и Букка (IPB) и с применением трофического диатомового индекса – TDI.

Результаты и обсуждение

В фитоперифитоне озера Имандра определено 114 таксонов водорослей рангом ниже рода, относящихся к 35 семействам, 67 родам и 7 отделам. Ниже приводится их список (в скобках указаны номера станций).

Отдел Cyanophyta/Cyanobacteria

Семейство Merismopediaceae Elenkin: *Aphanocapsa incerta* (Lemmermann) Cronberg et Komarek – (2–4), *Coelosphaerium kuetzingianum* Nageli – (2, 13), *Synechocystis aquatilis* Sauvageau – (2), *Woronichinia naegiliana* (Unger) Elenkin – (3, 4, 6); **Семейство Microcystaceae Elenkin:** *Gloecapsa* sp. – (2), *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing – (2–6, 12); **Семейство Chroococcaceae Nägeli:** *Chroococcus turgidus* (Kützing) Nageli – (3); **Семейство Scytonemataceae Rabenhorst ex Bornet et Flahault:** *Scytonema crispum* Bornet ex De Toni – (8); **Семейство Rivulariaceae Kützing ex Bornet et Flahault:** *Calothrix kossinskaja* Poljanskij – (6), *C. parietina* Thuret ex Bornet et Flahault – (15), *Dichothrix gypsophila* (Kützing) Bornet et Flahault – (1–15); **Семейство Microchaetaceae Lemmermann:** *Tolypothrix elenkinii* Hollerbach – (1–5, 9), *T. tenuis* Kützing ex Bornet et Flahault – (1–15); **Семейство Stigonemataceae Borzy:** *Stigonema informe* Kützing ex Bornet et Flahault – (15), *Stigonema mamillosum* (Lyngbye) Agardh ex Bornet et Flahault – (1, 2, 5–7, 10); **Семейство Nostocaceae C. A. Agardh:** *Dolichospermum flos-aquae* (Brebisson) Waecklin et al. – (4), *Dolichospermum lemmermannii* (Richter) Waecklin et al. – (6, 15), *D. spiroides* (Klebahn) Waecklin et al. – (4, 6, 9, 13), *Fischerella muscicola* Gomont – (3), *Nodularia*

spumigena Mertens ex Bornet et Flahault – (1–5), **Семейство Pseudoanabaenaceae Anagnostidis et Komarek:** *Limnothrix planktonica* (Wołoszyńska) Meffert – (4), *Pseudanabaena limnetica* (Lemmermann) Komárek – (3); **Семейство Phormidiaceae Anagnostidis et Komarek:** *Phormidium incrustatum* Gomont ex Gomont – (1), *Phormidium* sp. – (1), *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis et Komarek – (12, 15); **Семейство Oscillatoriaceae (S. F. Gray) Harvey ex Kirchner:** *Oscillatoria limosa* Agardh ex Gomont – (1, 3, 6).

Отдел Chrysophyta

Семейство Dinobryonaceae Ehrenberg: *Dinobryon bavaricum* O. E. Imhof – (1, 2, 13, 14), *D. divergens* O. E. Imhof – (1, 12);

Отдел Bacillariophyta

Семейство Stephanodiscaceae Gleser & Makarova: *Cyclotella meneghiniana* Kützing – (3, 6), *C. radiosa* (Grunow) Lemmermann – (1–5, 7, 9, 11), *C. rossii* Håkansson – (1, 4, 5), *C. stelligera* Cleve et Grunow – (1, 4, 11), *Stephanodiscus hantzschii* Grunow – (14) *S. minutulus* (Kützing) Cleve & Möller – (3), *S. rotula* (Ehrenberg) Hendey – (2, 3); **Семейство Melosiraceae Kützing:** *Melosira lineata* (Dillwyn) Agardh – (3), *M. varians* Agardh – (5); **Семейство Aulacoseiraceae R. M. Crawford:** *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen – (1–4, 9–11, 13), *A. italica* (Ehrenberg) Simonsen – (1–3, 7, 10, 15), *A. subarctica* (Otto Müller) E. Y. Haworth – (3, 13); **Семейство Rhizosoleniaceae Petit De Toni:** *Rhizosolenia longiseta* Zacharias – (13, 15); **Семейство Fragilariaceae Hustedt:** *Fragilaria capucina* Desmazieres – (1–15), *F. crotonensis* Kitton – (4–7, 9–13), *F. ulna* (Nitzsch) Lange-Bertalot – (1–6, 9–13), *Ceratoneis arcus* (Ehrenberg) Kützing – (1, 11), *Diatoma tenue* Agardh – (1), *D. vulgaris* Bory – (8, 9, 11, 13), *Meridion circulare* (Greville) Agardh – (13, 14), *Asterionella formosa* Hassall – (1), *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing – (1–15), *T. flocculosa* (Roth) Kützing – (1–15); **Семейство Eunotiaceae Kützing:** *Eunotia pectinalis* (Kützing) Ehrenberg – (11); **Семейство Achnantheaceae Kützing:** *Cocconeis placentula* Ehrenberg – (5, 7, 8, 11–13), *Eucocconeis flexella* (Kütz.) Brun – (5, 7, 8, 10, 11), *Achnanthes lanceolata* (Brebisson) Grunow – (1, 8), *A. minutissima* Kützing – (1–15); **Семейство Naviculaceae Kützing:** *Stauroneis anceps* Ehrenberg – (4, 12), *Navicula cryptocephala* Kützing – (1, 2, 6, 9, 11), *N. lanceolata* (Agardh) Ehrenberg – (3, 4), *N. radiosa* Kützing – (3, 12–15), *Frustulia rhomboides* (Ehrenberg) De Toni – (1–3), *Pinnularia gibba* Ehrenberg var. *gibba* – (3–6, 8, 9, 12), *P. nobilis* (Ehrenberg) Ehrenberg – (1–15), *P. viridis* (Nitzsch) Ehrenberg – (1, 3–7, 9–11, 14, 15), *Neidium dubium*

(Ehrenberg) Cleve – (4), *Amphora ovalis* (Kützing) Kützing – (6), *Cymbella affinis* Kützing – (1–15), *C. aspera* (Ehrenberg) Peragallo – (15), *C. cessatii* (Rabenhorst) Grunow – (4, 5), *C. cistula* (Ehrenberg) Kirchner – (1), *C. cymbiformis* Agardh – (14), *C. helvetica* Kützing – (3), *C. lanceolata* (Ehrenberg) Kirchner – (1, 15), *C. naviculiformis* (Auerwald) Cleve – (5), *C. silesiaca* Blesch – (1, 4, 5), *C. turgida* (Ehrenberg) Hassall, – (1–15), *C. tumida* (Brébisson) van Heurck – (1–15), *C. tumidula* Grunow – (3), *Gomphonema acuminatum* Ehrenberg – (1–15), *G. clavatum* Ehrenberg – (2, 6, 11, 13), *G. parvulum* (Kützing) Kützing – (4–6, 11, 12), *G. truncatum* Ehrenberg – (1–15), *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt – (3, 4, 12, 13); **Семейство Epithemiaceae Grunow:** *Epithemia adnata* (Kützing) Brébisson – (1–15), *E. sorex* Kützing – (1–5, 9–11, 13, 14), *Rhopalodia gibba* (Ehrenberg) O. Müller – (1–15); **Семейство Bacillariaceae Ehrenberg:** *Nitzschia acicularis* (Kützing) W. Smith – (4, 5), *N. linearis* (Agardh) W. Smith 1853 – (5, 6, 9); **Семейство Surirellaceae Kützing:** *Cymatopleura solea* (Brébisson) W. Smith – (4), *Surirella splendida* (Ehrenberg) Kützing 1844 – (1, 2, 5, 12).

Отдел Cryptophyta

Семейство Cryptomonadaceae Ehrenberg: *Cryptomonas* sp. – (6), **Семейство Pyrenomonadaceae G. Novarino & I. A. N. Lucas:** *Rhodomonas lacustris* Pascher et Ruttner – (6).

Отдел Dinophyta

Семейство Ceratiaceae Lindemann: *Cerati-um hirundinella* (O. F. Müller) Dujardin – (1, 2, 4, 15), *Peridinium aciculiferum* Lemmermann – (3, 14), *P. gosslaviense* Woloszyńska – (3); **Семейство Gymnodiniaceae Lankester:** *Gymnodinium* sp. – (3).

Отдел Euglenophyta

Семейство Euglenaceae Klebs: *Euglena* sp. – (1, 6), *Trachelomonas volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg – (1, 3–6).

Отдел Chlorophyta

Семейство Hydrodictyaceae Cohn: *Pedias-trum borianum* (Turpin) Meneghini – (2, 4), *P. tetras* (Ehrenberg) Ralfs – (4); **Семейство Scenedes-maceae Oltmanns:** *Scenedesmus bijugatus* Kützing – (1, 3, 4); **Семейство Microsporaceae Bohlin:** *Microspora amoena* (Kützing) Rabenhorst – (1–4, 8, 12–15), **Семейство Chaetophoraceae Greville:** *Chaetophora elegans* (Roth) C. Agardh – (9); **Семейство Coleochaetaceae Nägeli:** *Coleochaete scutata* Brébisson – (1); **Семейство Oedogoniaceae De Bory ex Hirn:** *Oedogonium* sp. – (1, 4, 6, 7, 11–13), *Bulbochaete* sp. – (3, 4, 8–15); **Семейство Mougeotiaceae Palla:** *Mougeotia* sp. (3); **Семейство Desmidiaceae Ralfs:** *Closterium acerosum* Ehrenberg ex Ralfs – (14, 15), *Cl. parvulum* Nägeli var. *Parvulum* – (9), *Cosmarium botrytis* Meneghini ex Ralfs – (10, 13), *Co. impressulum* Elfving – (10), *Co. punctulatum* Brébisson – (6, 9), *Co. reniforme* (Ralfs) W. Archer – (6, 9).

Выявленная альгофлора характеризуется значительной асимметрией на уровне отделов (табл. 1). Основа видового состава (94,8 %) сформирована представителями трех отделов: Cyanophyta, Bacillariophyta и Chlorophyta (104 вида). Водоросли остальных отделов включают только 10 видов. Большинство определенных видов типичны для альгофлоры перифитона Восточной Финляндии и постоянно присутствуют в водных экосистемах Мурманской области [Комулайнен, 2020].

Отдел Bacillariophyta, включающий 62 вида из 11 семейств, определяет видовое богатство, что является характерным для структуры фитоперифитона пресноводных систем. Ведущее положение в нем занимает семейство Naviculaceae (26 видов). Главная роль в формировании эпилитона принадлежит зигоморфным изопольным водорослям из родов *Tabellaria*,

Таблица 1. Таксономическая структура и пропорции альгофлоры перифитона озера Имандра
Table 1. Taxonomic structure and proportions of algoflora of the periphyton of Lake Imandra

Отделы Phylum	Fm		Gn		Sp		dSp	
	Sp	Sp%	Sp	Sp%	Sp	Sp%	Sp	Sp%
Цианопхита	11	31,4	20	29,9	27	23,7	0	0
Хризопхита	1	2,9	1	1,5	2	1,8	0	0,0
Бацилларифита	10	28,6	29	43,3	62	54,4	11	78,6
Криптофита	2	5,7	2	3,0	2	1,8	0	0
Динофита	2	5,7	3	4,5	4	3,5	0	0
Еугленопхита	1	2,9	2	3,0	2	1,8	0	0
Хлорофита	8	22,9	10	14,9	15	13,2	3	21,4
Всего Total	35	100	67	100	114	100	14	100

Примечание. Fm – семейства, Gn – роды, Sp – виды, dSp – доминирующие виды.

Note. Fm – families, Gn – genera, Sp – species, dSp – dominant species.

Fragilaria, *Achnanthes* и *Navicula*. Центрические диатомовые (семейства Melosiraceae, Stephanodiscaceae, Aulacoseiraceae и Rhizosoleniaceae) по числу видов занимают подчиненное положение в группировках обрастаний. В альгофлоре перифитона определено только шесть видов из родов *Cyclotella*, *Melosira*, *Aulacoseira* и *Rhizosolenia*. Однако некоторые из них достаточно постоянны: *Aulacoseira italica* (pF = 40,0 %) и *A. islandica* (pF = 53,3 %). Причем *A. islandica* – холодолюбивый, stenotherмный вид, часто достигающий массового развития в планктоне северных водоемов, доминирует в обрастаниях на одной из станций (ст. 10).

Обилие большинства синезеленых водорослей (Cyanophyta, Cyanoprokaryota), которые принадлежат к 11 семействам и 20 родам, невысоко, и ни один из видов не доминирует в альгоценозах. К особенностям эпиплтона относилось разнообразие гормогониевых водорослей (59,1 %), среди которых постоянны водоросли родов *Dichothrix*, *Tolypothrix*, *Stigonema*. Эти таксоны успешно функционируют не только в водных, но и в наземных экосистемах, что позволяет формировать устойчивые группировки в водоеме, для которого характерны перепады уровня воды и обсыхание субстрата. Они не входят в доминирующий комплекс, но в некоторых пробах их численность достигала 20 % от суммарной. Отмечены в альгоценозах и виды синезеленых водорослей, способные вызывать цветение: *Dolichospermum lemmermannii*, *D. flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa* и *Planktothrix agardhii*.

Среди 15 выявленных видов зеленых водорослей (Chlorophyta), относящихся к 7 семействам и 10 родам, только три таксона постоянны в альгоценозах перифитона. Во-первых, это не определенные до вида нитчатые зеленые водоросли из родов *Bulbochaete* (pF = 66,7 %) и *Oedogonium* (pF = 46,7 %). Они характерны для обрастаний в экосистемах Крайнего Севера и повсеместно присутствуют в олиготрофных водоемах бореальной зоны. Их постоянное присутствие в перифитоне свидетельствует о сходстве условий формирования альгофлоры. Следует также учесть, что обильное развитие именно нитчатых водорослей может создавать биопомехи в технических системах. Во-вторых, это *Microspora amoena* – вид, обычный как для планктонных, так и для донных альгоценозов в конце лета, который отмечен на 9 участках. Частое присутствие и разнообразие в альгоценозах десмидиевых водорослей свидетельствует об отсутствии значительных нарушений, вызванных антропогенной деятельностью на исследованных участках.

Водоросли отделов Chrysophyta, Dinophyta и Euglenophyta малоразнообразны, и хотя некоторые из таксонов типичные обитатели планктона (*Ceratium hirundinella*, *Dinobryon bavaricum* и *Trachelomonas volvocina*), достаточно постоянны в перифитоне (pF = 27–40 %).

Уровень сходства видового состава фитоперифитона на исследованных участках достаточно высок. Об этом свидетельствует значение коэффициента Серенсена, которое изменялось от 43 до 94 %, составляя в среднем 59 %. Общими для всех исследованных участков были 14 видов: *Dichothrix gypsophila*, *Tolypothrix tenuis*, *Fragilaria capucina*, *Tabellaria flocculosa*, *T. fenestrata*, *Achnanthes minutissima*, *Cymbella affinis*, *C. tumida*, *C. turgida*, *Gomphonema acuminatum*, *G. truncatum*, *Pinnularia nobilis*, *Epithemia adnata* и *Rhopalodia gibba*. Кроме того, еще 22 вида отмечены на половине исследованных участков. В то же время 38 видов (33,3 %) зарегистрированы только на одной и 20 (17,5 %) – на двух станциях. Это объясняет достаточно высокие значения индексов разнообразия Шеннона.

Характерной чертой фитоперифитона является четкое выделение группы доминантных видов. Доминирующий комплекс на отдельных исследованных участках включает от 1 до 5 таксонов (табл. 2). Причем часто разные виды доминируют по численности и биомассе. Это объясняется морфологическими особенностями водорослей, встречающихся в обрастаниях, представленных видами, заметно различающимися по размерам и объемам клеток.

К доминирующим видам отнесены 14 (12,3 %), из которых 7 доминируют по численности, а 12 по биомассе, формируя от 35 до 74 % от суммарной численности и от 48 до 81 % от суммарной биомассы. Причем 8 видов-доминантов (*Achnanthes minutissima*, *Fragilaria capucina*, *Tabellaria flocculosa*, *T. fenestrata*, *Cymbella affinis*, *C. tumida*, *C. turgida*, *Rhopalodia gibba*) были встречены на всех исследованных участках.

Значение численности водорослей в перифитоне достаточно высоко, а биомасса, как правило, заметно ниже наблюдаемой в конце биологического лета в водоемах региона. Это объясняется тем, что зеленые нитчатые водоросли не достигали высокого обилия, а ведущую роль в альгоценозах играли мелко-клеточные диатомеи: *Achnanthes minutissima* и *Fragilaria capucina* (pF = 60 и 67 % соответственно). Численность водорослей перифитона на исследованных участках изменялась от 195,2 до 13010,2 10^3 кл./см², а биомасса – от 6,8 до 202,7 мг/см².

В сложении биомассы основная роль также чаще принадлежит диатомовым водорослям.

Таблица 2. Общее количество видов (Sp), список доминирующих видов, индексы разнообразия (H), средние значения численности (N) и биомассы (B) для фитоперифитона исследованных участков озера Имандра

Table 2. Total number of species (Sp), list of dominant species, diversity indices (H), average abundance and bio-mass values for phytoperiphyton of the studied areas of Lake Imandra

Ст. St.	Sp	Численность / Abundance (N)			Биомасса / Biomass (B)		
		H	$\times 10^3$ кл./см ² $\times 10^3$ cells/cm ²	Доминанты / Dominant (N > 10 %)	H	мг/см ² mg/cm ²	Доминанты / Dominant (B > 10 %)
1	48	3,14	195,2	<i>Fragilaria capucina</i>	2,43	6,8	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Microspora amoena</i> <i>Coleochaete scutata</i>
2	41	2,92	1301,1	<i>Fragilaria capucina</i> <i>Cymbella affinis</i> <i>C. tumidula</i>	2,47	28,5	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Rhopalodia gibba</i> <i>Microspora amoena</i>
3	50	3,16	3252,5	<i>Fragilaria capucina</i> <i>Achnanthes minutissima</i>	2,34	106,9	<i>Fragilaria ulna</i> <i>Rhopalodia gibba</i> <i>Microspora amoena</i> <i>Mougeotia</i> sp.
4	49	3,14	3577,8	<i>Fragilaria capucina</i>	2,55	85,2	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Rhopalodia gibba</i> <i>Cymatopleura solea</i>
5	41	2,83	6505,3	<i>Fragilaria capucina</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,46	99,6	<i>Fragilaria ulna</i> <i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Rhopalodia gibba</i>
6	38	2,95	7155,5	<i>Fragilaria capucina</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,79	85,5	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Fragilaria ulna</i> <i>Rhopalodia gibba</i> <i>Epithemia adnata</i>
7	22	2,49	8456,5	<i>Fragilaria capucina</i> <i>Achnanthes minutissima</i>	2,34	109,6	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Rhopalodia gibba</i>
8	22	2,62	2602,3	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Fragilaria capucina</i> <i>Achnanthes minutissima</i>	2,41	41,6	<i>Tabellaria flocculosa</i>
9	31	2,56	2276,8	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>T. fenestrata</i> <i>Fragilaria capucina</i> <i>Achnanthes minutissima</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,45	44,7	<i>Tabellaria fenestrata</i> <i>T. flocculosa</i> <i>Fragilaria ulna</i> <i>Rhopalodia gibba</i>
10	25	2,51	13 010,2	<i>Aulacoseira islandica</i> <i>Achnanthes minutissima</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,68	202,7	<i>Aulacoseira islandica</i> <i>Tabellaria fenestrata</i> <i>T. flocculosa</i>
11	31	2,47	2927,3	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Achnanthes minutissima</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,60	41,1	<i>Aulacoseira islandica</i> <i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Fragilaria ulna</i>
12	29	2,60	3577,8	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Achnanthes minutissima</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,45	85,1	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Didymosphenia geminata</i> <i>Microspora amoena</i>
13	33	2,72	1951,5	<i>Tabellaria fenestrata</i> <i>Achnanthes minutissima</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,44	53,1	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Didymosphenia geminata</i> <i>Rhopalodia gibba</i> <i>Microspora amoena</i>
14	24	2,42	1301,3	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Achnanthes minutissima</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,20	27,3	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Rhopalodia gibba</i> <i>Microspora amoena</i>
15	29	2,39	2114,1	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Cymbella affinis</i>	2,40	40,2	<i>Tabellaria flocculosa</i> <i>Rhopalodia gibba</i> <i>Bulbochaete</i> sp.

Наиболее часто по биомассе доминировали *Tabellaria flocculosa* и *Rhopalodia gibba*, индекс доминирования для которых равен соответственно 93,3 и 66,7 % по биомассе. Реже встречаются сообщества, в которых по биомассе превалируют зеленые водоросли (*Bulbochaete* sp. и *Microspora amoena*).

Экологический анализ структуры перифитона позволил выявить группировки водорослей, различающиеся по отношению к основным характеристикам (pH, соленость, органическое загрязнение, температура и др.), а также по способности обитать в потоке и по требовательности к концентрации кислорода в воде.

Большая часть выявленных видов – это бентосные в широком смысле формы, т. е. связанные с субстратом (40 % от общего количества таксонов), еще 31 % видов встречаются как в планктоне, так и в донных альгоценозах. Многие из этих таксонов (49,1 %) относят к прикрепленным (перифитонным) формам [Wetzel, 1979]. В перифитоне озера Имандра среди них нитчатые зеленые и синезеленые водоросли, а также разнообразные диатомеи родов *Tabel-laria*, *Cocconeis*, *Cymbella*, *Gomphonema* и ряда других. Наряду с донными формами в перифитоне в значительных количествах обнаружены планктонные формы (33 вида).

По приуроченности к температурному режиму в фитоперифитоне преобладали индифференты (72,0 %). Отмечены также эвритермные и холодноводные виды.

В биогеографическом отношении состав выявленных водорослей характеризуется высоким разнообразием космополитов (77 %), количество которых существенно превышает число арктоальпийских и бореальных видов.

Среди идентифицированных нами таксонов водорослей более 70 являются индикаторами acidификации и минерализации. Среди видов – индикаторов кислотности наиболее разнообразны алкалифилы (43,7 %) и индифференты (29,6 %). Особенностью структуры перифитона в озере Имандра является отсутствие комплекса ацидофильных форм. Это диатомеи родов *Eunotia*, *Frustulia* и *Pinnularia*, широко распространенные в водоемах с высокой заболоченностью водосборов, с высокой цветностью и с pH ниже 7. Диатомеи рода *Tabel-laria*, которые также входят в эту группу, хотя и встречаются на всех исследованных участках, но и их относительное обилие не превышает 40 %. В то время как во многих водоемах Восточной Финляндии их относительная численность и биомасса может превышать 90 % от суммарной. Это можно объяснить подщелачиванием вод в озере до 7,5.

По отношению к минерализации 77,1 % из перечня индикаторных видов – это индифференты, т. е. типичные обитатели пресных вод. Галофилы, предпочитающие воды с повышенной минерализацией, и галофобы составляют примерно по 10 %.

Среди индикаторов загрязнения воды органическими веществами (по системе Т. Ватанабе) в фитоперифитоне преобладали эврисапробы (58,7 %) – водоросли, устойчивые к органическому загрязнению, обычно развивавшиеся в слабо и умеренно загрязненных водах. Обитателей чистых и слабозагрязненных вод – сапроксенов – заметно меньше (40 %).

Значительное число в фитоперифитоне индикаторов сапробности по системе Сладечека (95 таксонов) позволило корректно провести сапробиологический анализ. Обитатели чистых вод – ксено- и олигосапробионты, а также обитатели переходной между ними (χ -о, о- χ) зоны выявлены в количестве 35 видов и формируют 36,8 % от общего числа найденных видов – индикаторов сапробности. Более половины индикаторов сапробности (54,7 %) являются видами с высокой степенью толерантности к содержанию органических веществ (χ - β , о- β , β , β -о, о- α) и могут успешно вегетировать как в чистых, так и в загрязненных органикой водах. Только 8 видов-индикаторов (*Stephanodiscus hantzschii*, *Melosira varians*, *Diatoma tenue*, *D. vulgaris*, *Fragilaria crotonensis*, *Amphora ovalis*, *Epithemia adnata*, *Closterium acerosum*) относятся к обитателям загрязненных и грязных вод (8,5 %). Рассчитанные по фитоперифитону индексы сапробности изменяются от 1,3 до 1,7, а значения трофического диатомового индекса (TDI) – от 1,7 до 2,1. Это объясняется доминированием в перифитоне ксеноолиго- и олигосапробных видов, что позволяет отнести исследованные участки к олигосапробной зоне.

Заключение

На исследованных участках литорали озера Имандра в перифитоне выявлено 114 видов водорослей. Фитоперифитон сформирован видами, характерными для ненарушенных экосистем северных водоемов.

Таксономический состав фитоперифитона с учетом средних значений индексов разнообразия и плотности формируемых группировок позволяет судить о достаточно высокой степени развития фитоперифитона, его жизненной активности, саморегуляции и относительной устойчивости.

Структура фитоперифитона исследованных участков озера Имандра в таксономическом, географическом и экологическом отношении достаточно гомогенна. Ее структура определяется в первую очередь географическим положением, топографией водосбора, морфометрией и гидрологическими характеристиками озера и исследованных участков литорали. Она отражает естественную биотопическую однородность исследованных участков.

Показатели видового разнообразия для всех исследованных участков достаточно высоки, а параметры количественного развития (численность, биомасса) – умеренные. Все это говорит в пользу представления о том, что в целом исследованные участки водоема

находятся в удовлетворительном (хорошем) состоянии.

Проведенные нами исследования не позволяют считать представленный список видов достаточно полным. Дополнить список видового состава, выявить сезонную динамику видовой структуры, численности и биомассы фитоперифитона помогут дальнейшие исследования в озере Имандра. Тем более что исследования выполнены только в южной части озера в течение короткого периода. Таксономическое богатство может значительно увеличиться также при изучении альгоценозов изолированных заливов, в которые поступают воды многочисленных водотоков.

Сапробиологический анализ фитоперифитона не выявил заметных пространственных различий в качестве воды на исследованных участках. Санитарно-биологический анализ качества вод показал, что исследованные участки согласно системе оценки качества вод по сапробности водорослей относятся к олигосапробной зоне самоочищения, II классу чистоты воды – практически чистые воды по классификации Сладечека.

Явного влияния теплового сброса КАЭС на структуру фитоперифитона нами не отмечено. Это может быть связано с тем, что большинство точек отбора располагались на значительном расстоянии от сбросного канала. Кроме того, очевидно, что на мелководье прибрежной зоны теплая вода быстро охлаждается под влиянием температуры воздуха.

Литература

Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.

Вокуева С. И., Денисов Д. Б. Пространственно-временная динамика диатомовых комплексов озера Имандра (Россия, Мурманская область) // Вопросы современной альгологии. 2022. № 2(29). С. 75–82. doi: 10.33624/2311-0147-2022-2(29)-75-82

Денисов Д. Б., Валькова С. А., Кашулин Н. А. Экологические особенности перифитона и зообентоса водных экосистем Хибинского горного массива (Кольский полуостров) // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 1/2. С. 165–175. doi: 10.21443/1560-9278-2016-1/2-165-175

Денисов Д. Б., Кашулин Н. А. Современное состояние водорослевых сообществ планктона в зоне влияния Кольской АЭС (оз. Имандра) // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2013. № 3(16). С. 70–96.

Комулайнен С. Ф. Альгоценозы бентоса и перифитона // Методы гидробиологических исследований внутренних вод / Ред. А. В. Крылов. Борок: ИБВВ РАН; Ярославль: Филигрань, 2024. С. 185–216.

Комулайнен С. Ф. Фитоперифитон рек Мурманской области структура и использование при мониторинге // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2020. № 8. С. 58–68. doi: 10.37614/2307-5252.2020.2.8.006

Терентьева И. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1/2. С. 197–204. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.94-108

Шаров А. Н. Фитопланктон водоемов Кольского полуострова. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН; 2004. 113 с.

Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Denisov D. B., Demin V. I., Kashulin N. A., Terentyev P. M., Valkova 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. Hydrological and geochemical conditions // Water Resources. 2025. Vol. 52(S1). P. S1–S147. doi: 10.1134/S0097807825700010

Komulaynen S. F. Algological studies of fluvio-lacustrine systems in the northern European part of Russia // Int. J. Algae. 2007. Vol. 9(2). P. 139–149. doi: 10.1615/InterJAlgae.v9.i2.40

Wetzel R. G. Periphyton measurements and applications // Methods and measurements of periphyton communities: A review / American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1979. P. 3–33.

References

Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. Diversity of algal indicators in environmental assessment. Tel Aviv: Pilies Studio; 2006. 498 P. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Denisov D. B., Demin V. I., Kashulin N. A., Terentyev P. M., Valkova 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. Hydrological and geochemical conditions. *Water Resources*. 2025;52(S1):S1–S147. doi: 10.1134/S0097807825700010

Denisov D. B., Kashulin N. A. The phytoplankton communities under the Kola nuclear power plant impact (Lake Imandra). *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Kola Science Centre of RAS*. 2013;3(16):70–96. (In Russ.)

Denisov D. B., Val'kova S. A., Kashulin N. A. Ecological peculiarities of periphyton and zoobenthos of freshwater ecosystems of the Khibiny massif (the Kola Peninsula). *Vestnik MGTU = Vestnik of MSTU*. 2016;19(1/2):165–175. (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2016-1/2-165-175

Komulaynen S. F. Algocenoses of benthos and periphyton. In the book. *Metody gidrobiol. issledovaniy vnutrennikh vod = Methods of hydrobiol. studies of inland waters*. Borok: IBVV RAS; Yaroslavl: Filigran'; 2024. P. 185–216. (In Russ.)

Komulaynen S. F. Algological studies of fluvio-lacustrine systems in the northern European part of Russia. *Int. J. Algae*. 2007;9(2):139–149. doi: 10.1615/InterJAlgae.v9.i2.40

Komulaynen S. F. Phytoperiphyton in rivers of the Murmansk Region: structure and use in monitoring. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions*

of the Kola Science Centre of RAS. 2020;8:58–68. (In Russ.). doi: 10.37614/2307-5252.2020.2.8.006

Sharov A. N. Phytoplankton from the lakes of the Kola Peninsula. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. 113 p. (In Russ.)

Terentyeva I. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Estimate of the trophic status of subarctic Imandra Lake. *Vestnik MGTU = Vestnik of MSTU*. 2017;20(1-2):197–204. (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.94-108

Vokueva S. I., Denisov D. B. Spatial and temporal dynamics of diatom assemblages of Lake Imandra (Russia, Murmansk Region). *Voprosy sovremennoi al'gologii = Issues of Modern Algology*. 2022;2(29):75–82. (In Russ.). doi: 10.33624/2311-0147-2022-2(29)-75-82

Wetzel R. G. Periphyton measurements and applications. *Methods and measurements of periphyton communities: A review*. Philadelphia; 1979. P. 3–33.

Поступила в редакцию / received: 16.04.2026; принята к публикации / accepted: 04.08.2026.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Комулайн Сергей Федорович

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник
лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных

e-mail: biology@krc.karelia.ru, komsf@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Komulaynen, Sergey

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

УДК 574.583

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕЗОЗООПЛАНКТОНА В БУХТЕ БЛАГОПОЛУЧИЯ (СОЛОВЕЦКИЙ АРХИПЕЛАГ)

Н. В. Усов

Зоологический институт РАН (Университетская наб., 1, Санкт-Петербург,
Россия, 199034)

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. Александра Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030)

Работа посвящена оценке антропогенного влияния на сообщество зоопланктона в бухте Благополучия (остров Большой Соловецкий, Соловецкие острова). В июне 2025 и в августе 2024 и 2025 гг. на пяти станциях на разном удалении от внутренней части (кута) бухты проведены отбор проб мезозoopланктона и измерения температуры воды, солености, концентрации хлорофилла *a* и общего фосфора. Выявлено снижение суммарной численности зоопланктона в направлении кута бухты. Особенно резкое снижение зарегистрировано в августе 2024 и 2025 гг. на станции, расположенной в непосредственной близости от места поступления в бухту сточных вод из поселка Соловецкий. На этой же станции наблюдалось значительное (на порядок величин) повышение концентрации общего фосфора по сравнению с соседними точками. Таким образом, наиболее вероятной причиной снижения численности зоопланктона во внутренней части бухты Благополучия является антропогенное загрязнение данной акватории. Кроме того, во внутренней части бухты Благополучия обнаружен вид-вселенец *Eurytemora americana*, причем летом он развивается в значительных количествах (до 18 000 экз./м³). Это указывает на то, что данный вид обладает большим потенциалом для заселения прибрежных опресненных районов Белого моря.

Ключевые слова: Белое море; закрытые мелководные бухты; антропогенное влияние; общий фосфор; хлорофилл *a*; сообщество зоопланктона; вид-вселенец *Eurytemora americana*

Для цитирования: Усов Н. В. Современное состояние мезозoopланктона в бухте Благополучия (Соловецкий архипелаг) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 149–162. doi: 10.17076/lim2413

Финансирование. Полевые работы финансировались за счет средств госзадания «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» (FMEN 2024-0016), камеральная обработка проб и анализ данных выполнены в рамках госзадания «Структура, биоразнообразие и функционирование экосистем морей Арктического бассейна в условиях меняющегося климата» (тема № 125012800889-2).

N. V. Usov. CURRENT STATE OF MESOZOOPLANKTON IN BLAGOPOLUCHIYA BAY, SOLOVETSKY ARCHIPELAGO

Zoological Institute, Russian Academy of Sciences (1 Universitetskaya Emb., 199034 St. Petersburg, Russia)

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

In this work, we analyzed the human impact on the zooplankton community in Blagopoluchiya Bay (Bolshoy Solovetsky Island, Solovetsky Archipelago). Samples of mesozooplankton were collected, and water temperature, salinity, chlorophyll *a*, and total phosphorus concentrations were measured in June 2025 and in August 2024 and 2025 at 5 sites at different distances from the top of the bay. A decrease in the total abundance of zooplankton toward the bay top was revealed. A particularly sharp decline was recorded in August in 2024 and 2025 at the site located in close proximity to the outfall of wastewater from the Solovetsky settlement into the bay. The total phosphorus concentration at this site was significantly (by an order of magnitude) higher than in the neighboring sampling points. Thus, the most likely reason for the decrease in zooplankton abundance in the inner part of Blagopoluchiya Bay is anthropogenic pollution. In addition, the alien species *Eurytemora americana* was found in the inner bay. The species reaches high abundances in the summer (up to 18,000 ind./m³), which suggests it may have great potential to colonize brackish coastal areas of the White Sea.

Keywords: White Sea; enclosed shallow bays; anthropogenic impact; total phosphorus; chlorophyll *a*; zooplankton community; alien species *Eurytemora americana*

For citation: Usov N. V. Current state of mesozooplankton in Blagopoluchiya Bay, Solovetsky Archipelago. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 149–162. doi: 10.17076/lim2413

Funding. The study was carried out under two state assignments: fieldwork was supported by the program “The state of the coastal ecosystem of the White Sea within the Solovetsky Archipelago” (FMEN 2024-0016) and sample processing and data analysis were funded within state assignment “Structure, biodiversity and functioning of ecosystems of the seas of the Arctic basin in a changing climate” (#125012800889-2).

Введение

Морские экосистемы Арктики подвергаются воздействию как меняющегося климата [Comiso, Hall, 2014; Sun et al., 2016; Lind et al., 2018; Falardeau, Bennett, 2020; Huntington et al., 2020; Eriksen et al., 2025], так и нарастающего антропогенного воздействия [Holmes et al., 2000; Letcher et al., 2010; Arnold et al., 2016; Kirilyanov et al., 2020; Bartsch et al., 2021]. Актуальной задачей является оценка современного состояния экосистем прибрежной зоны северных морей для обеспечения экологической безопасности, своевременного предотвращения загрязнения морской среды и прибрежной зоны [Zhang et al., 2010; Grebmeier, 2012].

Слабоисследованным остается антропогенное воздействие на побережье Белого моря. Одним из наиболее нагруженных районов в Белом море является акватория в прибрежной зоне Соловецкого архипелага. Юго-западный берег о. Большой Соловецкий омывается водами залива Соловецкий, в вершине которого находится бухта Благополучия, закрытая

от моря многочисленными островами [Лощия..., 1983]. На берегах бухты расположен поселок Соловецкий, основу экономики которого составляют туризм, деятельность строительных и реставрационных организаций, рыболовство, водорослеводство, слабо развитое сельское хозяйство. В акватории развито судоходство, расположено несколько морских причалов. Соловецкие острова, и особенно Соловецкий залив, являются популярнейшим туристическим объектом – за сезон здесь бывает около 50 тыс. человек (по материалам ТАСС: <https://tass.ru/obschestvo/26257477>).

Столь интенсивная деятельность человека не может не сказываться на состоянии местной водной экосистемы. Комплексные междисциплинарные исследования прибрежной экосистемы Соловецкого архипелага Белого моря (бухта Благополучия) начаты в августе 2024 г. и продолжены в 2025 г. сотрудниками Карельского научного центра РАН. По данным измерений в августе 2024 г. и апреле 2025 г. выявлены особенности гидродинамики и распространения сточных вод по акватории бухты

[Лукина и др., 2025; Здоровеннов и др., 2025], определены содержание биогенных элементов в воде бухты [Лукина и др., 2025] и ее трофический статус [Калинкина и др., 2025]. Показано, что наибольшее антропогенное воздействие испытывает кутовая часть бухты, куда поступают неочищенные сточные воды поселка и монастыря. Данные химического состава вод свидетельствуют о четырехкратном увеличении концентрации общего фосфора в открытой части бухты за последние 30 лет. По содержанию биогенных элементов ($P_{\text{общ}}$ до 640 мкг/л и $N_{\text{общ}}$ до 2,50 мг N/л) трофический статус бухты определен как эвтрофный-гипертрофный [Калинкина и др., 2025]. Выявлены повышенные значения численности (до 2502 тыс. кл./л) и биомассы (до 2059 мг/м³) фитопланктона с массовым развитием цианобактерий в кутовой части бухты рядом с местом сброса сточных вод, свидетельствующие об эвтрофировании акватории. При этом видовое разнообразие фитопланктона заметно сократилось за 30-летний период. В период ледостава (апрель 2025 г.) сточные воды распространяются и накапливаются подо льдом в акватории бухты, практически не перемешиваясь с морскими водами. К апрелю 2025 г.

за пять месяцев ледостава толщина подледного слоя сточных вод достигла 0,5 м по всей акватории бухты [Здоровеннов и др., 2025].

Зоопланктон следует признать наиболее чувствительным компонентом водных экосистем благодаря малым размерам планктонных животных и коротким жизненным циклам. При этом зоопланктон является важнейшим связующим звеном между первичными продуцентами и более высокими трофическими уровнями, в первую очередь рыбами. Следовательно, крайне важно следить за состоянием зоопланктонного сообщества в условиях столь сильной антропогенной нагрузки.

Цель работы: оценка состояния сообщества зоопланктона, его пространственной неоднородности и межгодовых изменений в бухте Благополучия (остров Большой Соловецкий, Белое море).

Материалы и методы

Пробы зоопланктона отбирали 17 августа 2024 г., 16 июня и 13 августа 2025 г. на пяти точках, расположенных на разном расстоянии от внутренней части бухты Благополучия (рис. 1).

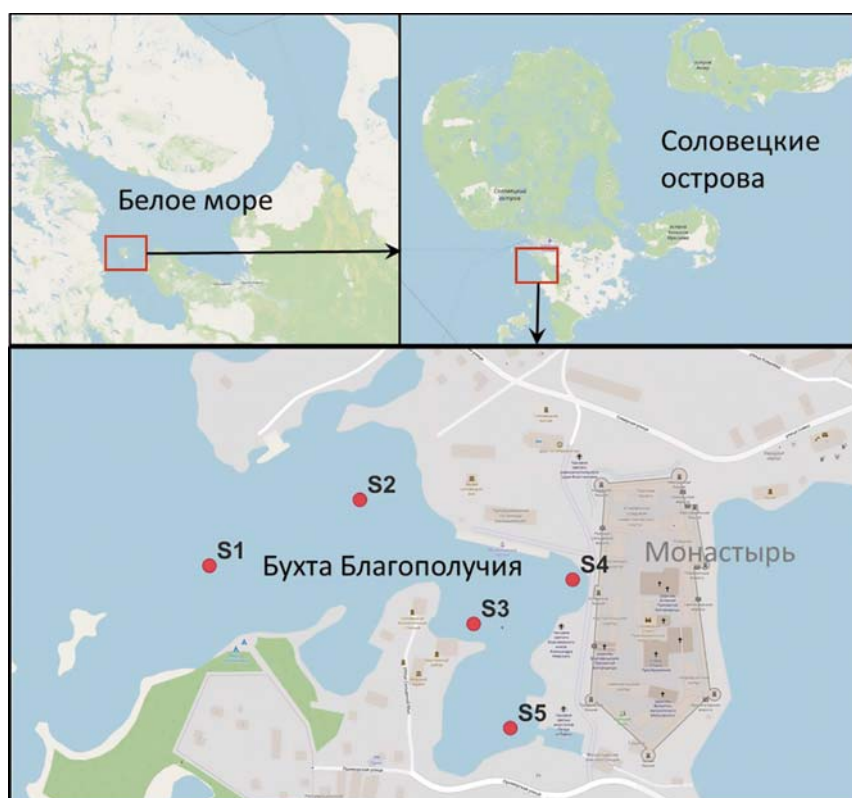


Рис. 1. Карта-схема района работ в бухте Благополучия. Показаны гидро-биологические станции

Fig. 1. Schematic map of the research area in Blagopoluchiya Inlet. Hydrobiological stations are indicated

При этом точка S5 расположена во внутренней части бухты (в куту) и наиболее удалена от открытого моря, а точка S1 – в открытой части. Точку S1 считали фоновой при анализе влияния антропогенных факторов на зоопланктон. Точки S1 и S2 относили к внешней части бухты, а точки S3–S5 – к внутренней. Отбор проб зоопланктона и измерения гидрологических параметров проводили в течение одного дня на разных фазах приливного цикла: 17 августа 2024 г. и 16 июня 2025 г. – во время малой и полной воды, то есть, соответственно, во время полного отлива и прилива (во время стояния уровня). 13 августа 2025 г. работы выполняли в конце отлива и прилива, примерно за 1,5 часа до малой и полной воды. Поэтому при статистическом анализе эти станции рассматривали вместе со станциями, работы на которых были выполнены, соответственно, на малой и полной воде. Перепад уровня между полным отливом и полным приливом, то есть между малой и полной водой, составлял не более 0,8 м.

При отборе проб мезозоопланктона использовали сеть Джеди с диаметром входного отверстия 26 см и ячейей фильтрующего сита 100 мкм. На самой глубокой и мористой станции S1 пробы отбирали вертикальной протяжкой сети в слое 0–5 м. На остальных, более мелководных (глубины не превышали 5 м в полную воду) станциях пробы отбирали из поверхностного горизонта 10-литровым ведром, проливая воду через планктонную сеть. На каждой станции фильтровали 250 л воды (0,25 м³), что приблизительно равно объему, проходящему через сеть при протяжке с 5-метровой глубины. Всего собрано 30 проб зоопланктона. Пробы фиксировали формалином (2–4 %) и обрабатывали счетным методом [Инструкция..., 1971]. Для этого объем пробы доводили до 200 мл, брали из нее 3 аликвоты по 1 мл, в которых подсчитывали массовые формы (> 5–10 экз. на аликвоту), затем во всей пробе подсчитывали менее многочисленных животных. Для подсчета планктонных животных использовали стереомикроскоп МБС-9.

Определение видов зоопланктона проводили по «Определителю фауны и флоры северных морей СССР» [1948] с коррекцией таксономии по World Register of Marine Species [WoRMS..., 2026], веслоногих ракообразных – по «Biodiversity of Marine Planktonic Copepods» [Razouls et al., 2005–2026].

Для определения концентрации хлорофилла *a* спектрофотометрическим методом [Determination..., 1966] из поверхностного слоя были отобраны пробы воды объемом 1 л [Калинкина и др., 2025].

Общую концентрацию фосфора в поверхностном слое определяли спектрофотометрическим методом в соответствии с [РД 52.24.387-2006]. Содержание общего фосфора измерено с использованием оборудования ЦКП КарНЦ РАН.

Вертикальные зондирования температуры и солёности проведены океанографическими зондами CTD-90M (Sea&SunTechnology, Германия) и RBR-Concerto (RBR Ltd., Канада).

Наиболее массовые виды, численность которых превышала 10 % суммарной численности зоопланктона, рассматривались как доминантные. Сравнение численности зоопланктона и параметров среды в разные даты и на разных фазах приливного цикла проводили с использованием непараметрических критериев по причине малого размера выборок и распределения переменных, далекого от нормального. Для сравнения численности зоопланктона в разные даты использовали метод знаков (Sign test). Для сравнения численности зоопланктона и параметров среды на разных фазах приливного цикла и на разных станциях, а также параметров среды в разные даты использовали анализ Краскела – Уоллиса (Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks). Связь между переменными оценивали с помощью непараметрического коэффициента корреляции Спирмена. Значимость результатов оценивалась на уровне значимости (p) 0,05. Для анализа использовали программу Statistica 7.0.

Результаты

Параметры среды. В бухте Благополучия четкий градиент температуры в направлении от входа к внутренней части прослеживался только в июне 2025 г. как во время полной, так и во время малой воды (рис. 2, а). Слабое повышение температуры в том же направлении отмечено в августе 2024 г., тогда как в августе 2025 г. закономерности в распределении температуры не выявлены. Градиенты солёности выражены намного слабее – только на полной воде в августе 2024 г. и во время малой воды в июне 2025 г. можно было говорить о снижении солёности к куту бухты (рис. 2, б). Причем в июне это выражено наиболее ярко. Концентрация хлорофилла *a* повышается в направлении кута бухты (рис. 3, а), и различия между станциями значимы, согласно непараметрическому критерию Краскела – Уоллиса. При этом различия значимы во время малой воды и отлива ($H(4, N=15) = 12,8; p = 0,012$) и на грани значимости во время полной воды и прилива ($H(4, N=15) = 9,4; p = 0,051$).

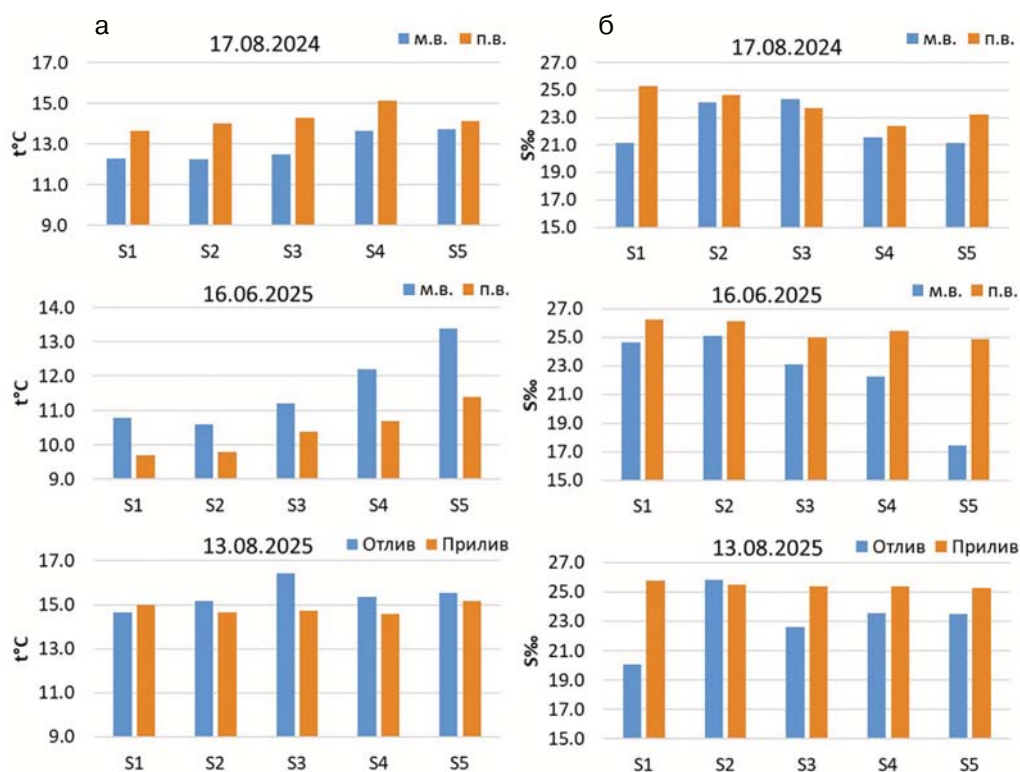


Рис. 2. Температура (а) и соленость (б) в бухте Благополучия. Здесь и далее: ст. S1 – внешняя часть бухты, S5 – внутренняя часть; п. в. – полная вода, м. в. – малая вода

Fig. 2. Temperature (a) and salinity (б) in Blagopoluchiya Inlet. Here and hereinafter: S1 station – outer part of the inlet, S5 – the innermost point; п. в. – high tide, м. в. – low tide

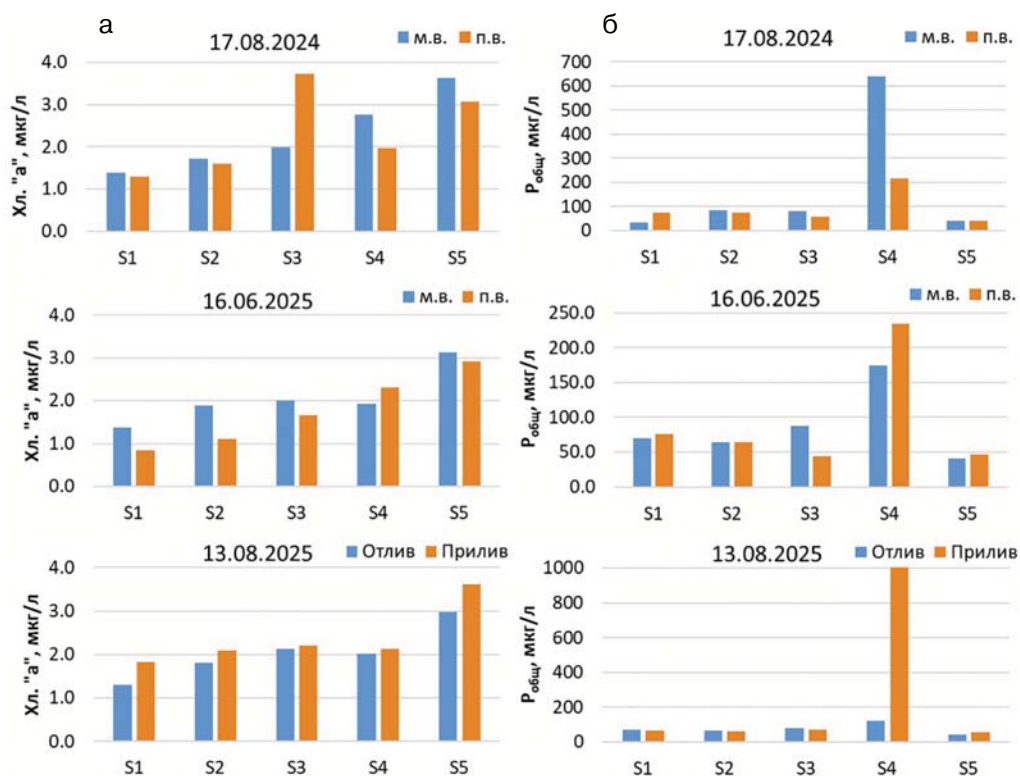


Рис. 3. Концентрация хлорофилла а (а) и общего фосфора (б) в бухте Благополучия

Fig. 3. Concentration of chlorophyll a (а) and total phosphorus (б) in Blagopoluchiya Inlet

Только в августе 2024 г. на полной воде тренд нарушался из-за скачка параметра на ст. S3. Устойчивый положительный градиент хлорофилла *a* указывает на изменение трофического статуса в сторону эвтрофности по направлению к куту бухты [Калинкина и др., 2025]. Из биогенных элементов, имеющих значение для развития планктона, мы рассмотрели только фосфор, так как его концентрация подвержена наибольшей пространственной изменчивости в бухте Благополучия (рис. 3, б). Во все даты максимум концентрации общего фосфора наблюдался на ст. S4. При этом от остальных станций данный показатель отличался как минимум в 2 раза и как максимум – на порядок величин (в августе оба года).

Температура воды на всех станциях менялась в зависимости от фазы приливного цикла: наиболее выражены изменения были в августе 2024 г. (снижение во время малой воды и повышение во время полной) и в июне 2025 г. (снижение во время полной воды и повышение во время малой) (рис. 2, а), менее выражены – в августе 2025 г. Соленость изменялась в течение приливного цикла наиболее заметно только в июне 2025 г., во время малой воды она была ниже, чем во время полной, на всех станциях (рис. 2, б). В целом такая тенденция преобладала и в остальные даты, хотя различия между фазами прилива были незначительны. Остальные параметры не демонстрировали заметных и закономерных изменений в течение приливного цикла.

Межгодовые изменения температуры воды можно проследить в августе. В 2024 г. было несколько холоднее, чем в 2025 г., хотя различия находились на грани значимости согласно тесту Краскела – Уоллиса ($z' = 2,36$; $p = 0,055$). Соленость в августе 2024 г. была незначительно ниже, чем в 2025 г. ($z' = 1,90$; $p = 0,17$). Закономерности в межгодовых различиях остальных параметров не прослеживаются.

Состав, распределение и динамика мезооупланктона. В бухте Благополучия наблюдался в целом типичный для соответствующего сезона в прибрежной зоне Белого моря состав зоопланктона [Прыгункова, 1985]. В зоопланктоне бухты Благополучия выявлено 34 таксона истинно планктонных организмов и личинок донных беспозвоночных (табл. 1). Как по видовому богатству, так и по численности доминировали копеподы (12 таксонов, до 99 % общей численности зоопланктона). В разное время года в бухте получали преимущество разные виды веслоногих ракообразных (Сорерода). В сообществе зоопланктона в бухте Благополучия отмечена крайне высокая степень доминирования – во все даты на всех станциях

не более 1–2 видов составляли выше 50 % суммарной численности. В июне 2025 г. на большинстве станций доминировали рачки рода *Pseudocalanus* (в среднем 49 % общей численности), в качестве субдоминанты выступали представители рода *Acartia* (27 %), а на ст. S5 – коловратки (более 50 %). В августе оба года доминировали *Acartia* spp. (34 % в 2024 г. и 59 % в 2025 г.) и *Evadne nordmanni* (Cladocera; 22 % в 2024 г. и 13 % в 2025 г.), при этом род *Acartia* был представлен почти исключительно видом *A. longiremis*, который тяготеет к открытой части бухты. В 2024 г. на станциях S3 и S5 во внутренней части бухты доминировала *Eurytemora americana*, особенно на полной воде (более 50 % общей численности). В августе 2025 г. численность этого вида была на порядок ниже, причем наибольшее его обилие отмечено на ст. S1 и S5 на приливе и отливе и на ст. S3 на приливе. Данный вид является новым для Белого моря, и высокая его численность позволяет предположить высокий инвазионный потенциал в прибрежных акваториях Белого моря [Сухих, Усов, 2026].

Доминирование холодноводных *Pseudocalanus* spp. характерно для весеннего периода в прибрежной зоне Белого моря [Прыгункова, 1974; Кособокова, Перцова, 2012]. Доминирование бореальных тепловодных видов *Acartia* spp. в июне на некоторых внутренних станциях можно объяснить достаточным для данного вида прогревом поверхностного слоя воды, в котором отбирали пробы. Так, вода на поверхности на внутренних станциях 16 июня 2025 г. прогрелась выше 10 °C, тогда как оптимальная для этого вида температура составляет 8,3 °C [Зубаха, Усов, 2004]. В летний период на первое место выходят бореальные тепловодные виды, особенно *Acartia* spp., что также является нормой для этого времени года в Белом море [Прыгункова, 1974; Кособокова, Перцова, 2012]. Летом оба года на втором месте по численности была *Evadne nordmanni* (Cladocera). В прибрежье Белого моря данный вид является массовым в июле–августе [Прыгункова, 1974]. *E. nordmanni* – эвригалинный тепловодный вид, обитающий и в океане, и в сильно опресненном Балтийском море [Gieskes, 1971; Poggensee, Lenz, 1981]. Температура и соленость в районе исследований находятся в пределах, оптимальных для данного вида [Зубаха, Усов, 2004; Usov et al., 2013].

В распределении суммарной численности зоопланктона, кроме фазы полной воды 17.08.2024 и 16.06.2025, можно проследить тенденцию к снижению в направлении от открытой к внутренней части бухты (рис. 4 и 5).

Таблица 1. Состав мезозоопланктона в бухте Благополучия
Table 1. Mesozooplankton composition in Blagopoluchiya Inlet

Таксон Taxa	2024	2025	
	Август August	Июнь June	Август August
п/тип (subphyl.) Crustacea, кл. (class) Copepoda			
отр. (order) Calanoida			
<i>Calanus glacialis</i> Jaschnov, 1955	-	+	-
<i>Pseudocalanus</i> spp. Boeck, 1872	+	+	+
<i>Acartia longiremis</i> (Lilljeborg, 1853)	+	+	+
<i>A. bifilosa</i> (Giesbrecht, 1881)	+	+	+
<i>Centropages hamatus</i> (Lilljeborg, 1853)	+	+	+
<i>Temora longicornis</i> (Müller, 1792)	+	+	+
<i>Eurytemora americana</i> Williams, 1906	+	+	+
отр. (order) Cyclopoida			
<i>Oithona similis</i> Claus, 1866	+	+ *	+
<i>Triconia borealis</i> (Sars, 1918)	+	+	+
Cyclopoida (<i>Cyclopina</i> sp. Claus, 1863)	-	-	+
отр. (order) Harpacticoida			
<i>Microsetella norvegica</i> (Boeck, 1864)	+	+	+
Harpacticoida gen. sp.	+	+	+
п/тип (subphyl.) Crustacea, кл. (class) Branchiopoda, отр. (order) Onychopoda			
<i>Podon leuckarti</i> (Sars G. O., 1862)	+	+	+
<i>Evadne nordmanni</i> Lovén, 1836	+	+	+
<i>Pleopis polyphemoides</i> (Leuckart, 1859)	+	-	+
п/тип (subphyl.) Crustacea, п/кл. (infraclass) Cirripedia, личинки/larvae	+	+	+
п/тип (subphyl.) Crustacea, отр. (order) Amphipoda, молодь/juveniles	-	-	+
п/тип (subphyl.) Crustacea, отр. (order) Euphausiacea, молодь/juveniles	-	-	+
п/тип (subphyl.) Tunicata, кл. (class) Appendicularia			
<i>Fritillaria borealis</i> Lohman, 1896	+	-	+
п/тип (subphyl.) Medusozoa, кл. (class) Hydrozoa			
<i>Sarsia tubulosa</i> (M. Sars, 1835)	+	+	+
<i>Obelia longissima</i> (Pallas, 1766)	+ *	+	-
<i>O. geniculata</i> (Linnaeus, 1758)	-	+	-
<i>Rathkea octopunctata</i> (M. Sars, 1835)	-	+	-
тип (phylum) Ctenophora, личинки/larvae	+	-	+ *
тип (phylum) Chaetognatha			
<i>Parasagitta elegans</i> Verrill, 1873	-	+	-
кл. (class) Polychaeta, личинки/larvae	+ *	+	+ *
тип (phylum) Mollusca, кл. (class) Bivalvia			
<i>Mytilus edulis</i> Linnaeus, 1758, личинки/larvae	+	-	+
<i>Heteranomia squamula</i> (Linnaeus, 1758), личинки/larvae	+	-	+
<i>Hiatella arctica</i> (Linnaeus, 1767) личинки/larvae	+	-	+
Bivalvia gen. sp., личинки/larvae	+	-	+
тип (phylum) Mollusca, кл. (class) Gastropoda, личинки/larvae	+	+	+
тип (phylum) Bryozoa, личинки/larvae	+	-	+
тип (phylum) Rotifera			
<i>Asplanchna</i> sp. Gosse, 1850	+	+	-
<i>Synchaeta</i> sp. Ehrenberg, 1832	+	+	-

Примечание. Показано присутствие в разные даты отбора проб (+). * Обнаружены единичные экземпляры (до 8 экз./м³ в единственной пробе в данную дату).

Note. Presence on specific date is indicated by (+). * Single individuals are found (up to 8 m⁻³ in a single sample on this sampling date).

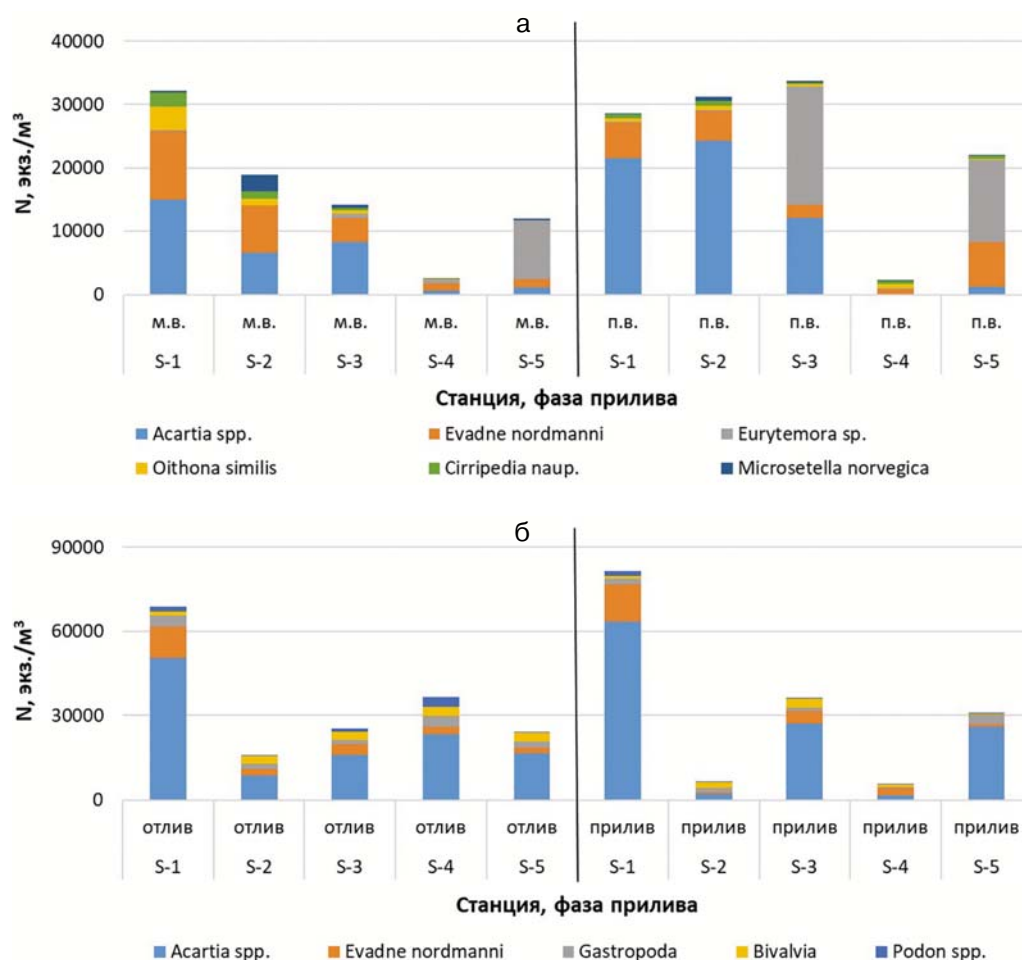


Рис. 4. Распределение мезозoopланктона и основных таксонов планктонных животных в бухте Благополучия 17 августа 2024 г. (а) и 13 августа 2025 г. (б)

Fig. 4. Distribution of mesozooplankton and main taxa of planktonic animals in Blagopoluchiya Inlet, August 17, 2024 (a) and August 13, 2025 (б)

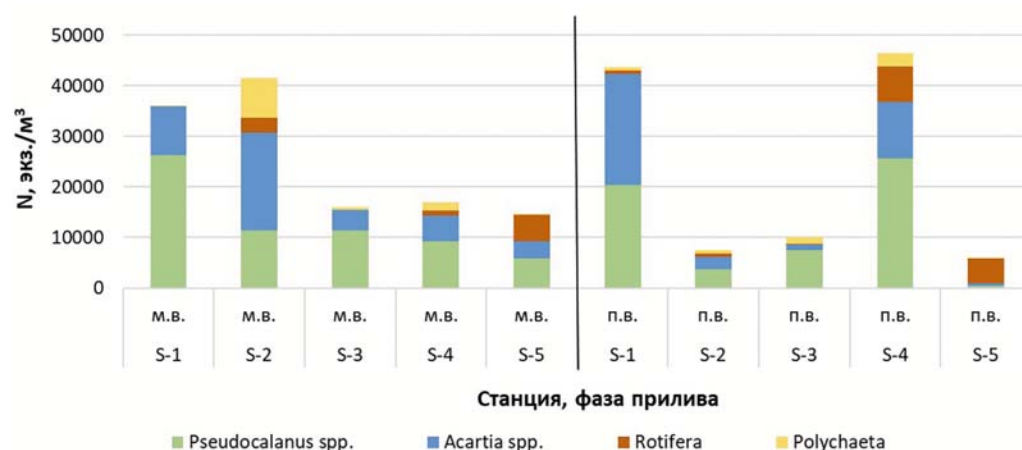


Рис. 5. Распределение мезозoopланктона и основных таксонов планктонных животных в бухте Благополучия 16 июня 2025 г.

Fig. 5. Distribution of mesozooplankton and main taxa of planktonic animals in Blagopoluchiya Inlet, June 16, 2025

Хотя, как показал тест Краскела – Уоллиса, значимых изменений численности зоопланктона между станциями нет (табл. 2), в большинстве случаев наивысшие значения численности отмечены на ст. S1. В августе 2024 г. описанный выше тренд нарушался из-за массового развития *Eurytemora americana* на ст. S3 и S5 на полной воде. В половине всех наблюдений минимальная численность имела место на ст. S4. 16 июня 2025 г. на ст. S4 на полной воде, напротив, наблюдался скачок численности, обусловленный массовым развитием *Pseudocalanus* spp.

Максимальная численность планктонных животных отмечена на ст. S1 13.08.2025 на приливе (84 770 экз./м³), в этот же день среднее значение обилия мезозоопланктона по акватории также было максимальным за весь период наблюдений. Минимальная численность наблюдалась на ст. S4 17.08.2024 на полной воде (3492 экз./м³), средняя численность также была наименьшей за период исследований. При этом средняя по всем станциям суммарная численность зоопланктона в разные даты и на разных фазах приливного цикла значимо не различалась (табл. 2). Суммарная численность зоопланктона в акватории бухты Благополучия в августе 2024 и 2025 гг. значимо не различается, несмотря на существенное повышение максимальных ее значений в 2025 г. Это следствие более равномерного количественного распределения зоопланктона в августе 2024 г.,

без столь резкого превышения численности на ст. S1 над другими точками, как в августе 2025 г.

Мы изучили закономерности в распределении по акватории бухты Благополучия массовых видов планктонных животных, численность которых была не менее 10 % от суммарной численности зоопланктона (рис. 6). Оценить значимость различий удалось только для *Acartia* spp., которые входили в группу доминант во все даты. Численность видов рода *Acartia* не различалась значимо между станциями, однако обычно их численность выше на внешних станциях S1 и S2 и во время малой, и во время полной воды. Проверить значимость различий численности остальных таксонов между станциями невозможно в связи с малым количеством повторностей, поэтому далее речь пойдет о тенденциях. Численность *Evadne nordmanni* снижалась в направлении кута бухты в августе оба года, лишь в 2024 г. на ст. S5 на полной воде эта закономерность нарушалась. В июне *E. nordmanni* не входил в группу доминантных видов. Численность коловраток (Rotifera) в августе 2024 г. снижалась к куту бухты, в июне 2025 г. численность этого таксона была на два порядка выше и повышалась в том же направлении. В августе 2025 г. коловратки отсутствовали. Личинки брюхоногих моллюсков входили в группу доминант только в августе 2025 г., при этом имело место двухвершинное распределение – с высокими значениями в открытой части бухты и в куту.

Таблица 2. Результаты сравнения суммарного обилия мезозоопланктона в бухте Благополучия в разные даты и фазы приливного цикла, а также на разных точках отбора проб

Table 2. Results of comparison of the total zooplankton abundance in Blagopoluchiya Inlet on different dates, tide phases and at different sampling stations

Сравнение дат – метод знаков Date comparison – Sign test		
	Z (n = 10)	p
17.08.24 – 16.06.25	0,95	0,34
17.08.24 – 13.08.24	1,58	0,11
16.06.25 – 13.08.25	0,95	0,34
Сравнение разных фаз прилива – анализ Краскела – Уоллиса Tidal phase comparison – Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks		
	H (n = 5)	p
17.08.24	0,53	0,46
16.06.25	0,27	0,6
13.08.25	0,01	0,92
Сравнение разных станций – анализ Краскела – Уоллиса Station comparison - Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks		
	H (n = 15)	p
Малая вода и отлив Low tide and ebb	5,7	0,23
Полная вода и прилив High tide and flood	4,6	0,33

Подобное распределение наблюдалось и во время малой воды в августе 2024 г.

Особенностью данной акватории является присутствие в значительных количествах вида-вселенца *Eurytemora americana*, который ранее не встречался в Белом море (рис. 6) [Сухих, Усов, 2026]. Численность *E. americana* распределена в августе 2024 г. крайне неравномерно: около 10 тыс. экз./м³ и выше на ст. S3 и S5, но значительно ниже 1000 экз./м³ на остальных станциях. В августе 2025 г. численность этого вида была на порядки величин ниже, но сохранилась тенденция к относительно более высоким ее значениям во внутренней части бухты. Помимо вероятных конкурентных отношений данного вида и *Acartia* spp. [Калинкина и др., 2025] столь неравномерное распределение может быть следствием органического загрязнения в бухте Благополучия. Так, «провал» обилия *E. americana* на ст. S4 можно объяснить тем, что концентрация общего фосфора в августе превышала здесь фоновую на порядки величин. Это же, по всей видимости, послужило причиной резкого снижения суммарной численности зоопланктона. Интересно,

что на отливе 13 августа 2025 г. содержание фосфора было повышено незначительно и численность зоопланктона также не снизилась по сравнению с окружением. В июне превышение концентрации общего фосфора на ст. S4 было не столь сильным, как в августе, при этом численность зоопланктона здесь также не снижалась по сравнению с остальными станциями внутренней части бухты.

Представляет интерес распределение менее многочисленных видов, обилие которых, однако, может достигать тысяч на отдельных станциях. *Oithona similis* во время малой воды демонстрирует снижение численности по направлению к куту бухты Благополучия. Это океанический вид-космополит, один из наиболее массовых в Белом море [Шувалов, 1965; Прыгункова, 1974], однако в бухте Благополучия он не входит даже в состав видов-доминантов, тяготея к открытой части бухты. Температура и соленость в бухте Благополучия не выходят за пределы оптимальных для этого вида [Зубаха, Усов, 2004; Usov et al., 2013]. В данной акватории *O. similis*, по-видимому, вытеснен более многочисленными *Acartia* spp. Вероятно также,

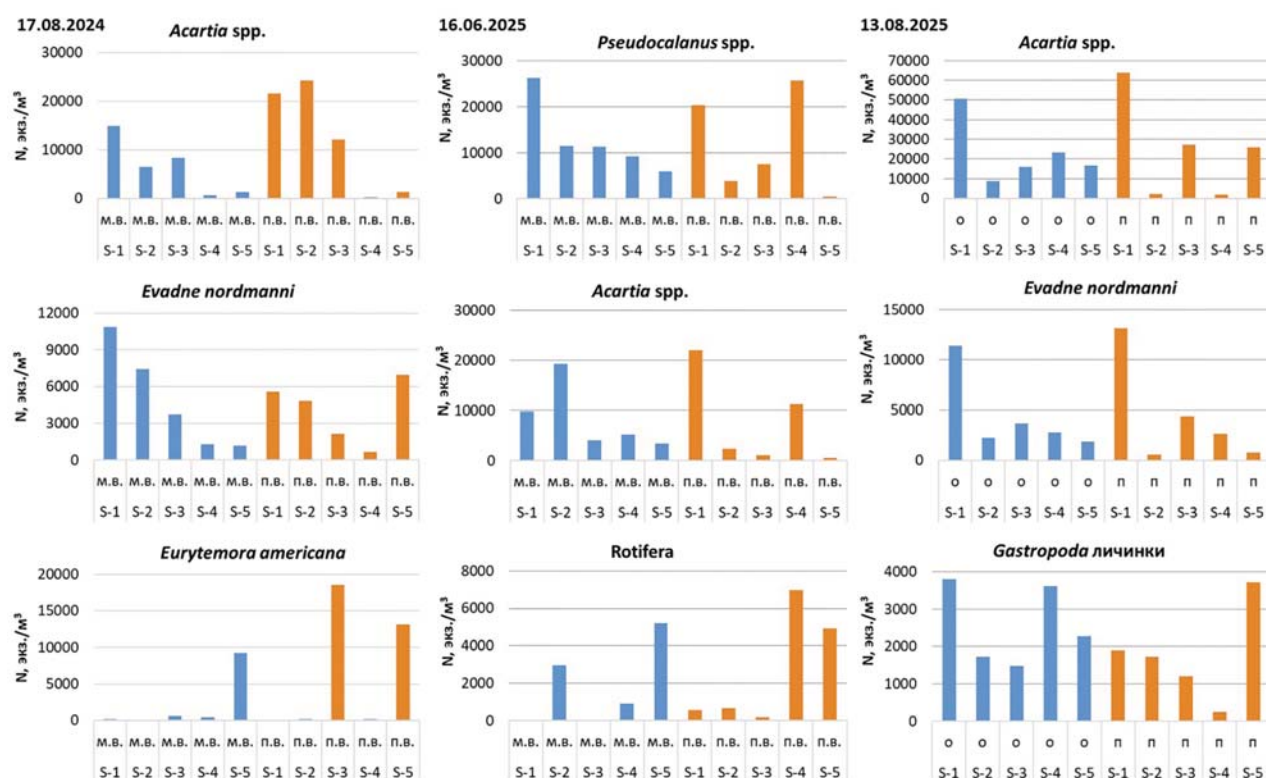


Рис. 6. Распределение массовых видов в бухте Благополучия:

о – отлив, п – прилив

Fig. 6. Distribution of abundant species in Blagopoluchiya Inlet on different dates:

о – ebb, п – tide

что высокая степень эвтрофикации [Калинкина и др., 2025; Лукина и др., 2025] отрицательно влияет на популяцию данного океанического вида в бухте Благополучия. Тем не менее *O. similis* входит в число доминантов на ст. S4 на полной воде 17.08.2024, что можно объяснить заносом из открытой части бухты с приливом.

Личинки усоногих ракообразных (Cirripedia) во время малой воды 17.08.2024 демонстрировали снижение численности по направлению к куту бухты Благополучия. На приливе в распределении этих организмов не обнаружено каких-либо четких градиентов. Распределение личинок Cirripedia, как и Gastropoda, по всей видимости, соответствует распределению их взрослых стадий в бентосе.

Корреляционный анализ суммарного обилия зоопланктона и основных факторов среды (температуры воды и солёности) не выявил значимых связей. Не установлено значимой корреляции суммарного обилия с концентрацией фосфора, однако анализ динамики этих двух параметров показал, что максимальные значения концентрации фосфора совпадали с наибольшим снижением численности зоопланктона. Кроме того, тенденция к снижению обилия зоопланктона на внутренних станциях совпала с повышением концентрации хлорофилла *a* в том же направлении. При этом во время малой воды и отлива, действительно, существует отрицательная корреляция между обилием зоопланктона и концентрацией хлорофилла *a* (Spearman $r = -0,61$; $p = 0,015$). Увеличение концентрации хлорофилла указывает на успешное развитие фитопланктона в условиях слабого пресса планктонных фитофагов и достаточного количества биогенных элементов [Калинкина и др., 2025]. Снижение обилия планктонных животных, вероятно, определяется воздействием гидрохимических факторов. Помимо значительного повышения концентрации биогенных элементов, особенно фосфора, в условиях интенсивного поступления органического вещества и высоких температур может снижаться содержание кислорода в воде, что также негативно влияет на планктонных животных. Однако, чтобы доказать это, необходимо дополнить наблюдения в бухте Благополучия измерениями концентрации кислорода и его биологического потребления.

Заключение

Наиболее яркой особенностью бухты Благополучия является аномально высокая концентрация общего фосфора во внутренней части акватории. Это повышение приурочено к месту поступления в бухту сточных вод поселка

Соловецкий. Именно во внутренней части бухты наблюдается угнетенное состояние зоопланктона, которое выражается в тенденции к снижению общего обилия в весенне-летний период по сравнению с открытым морем в несколько раз, а иногда – на порядок. Данные изменения в сообществе нельзя связать с градиентами основных гидрофизических и гидрохимических факторов – температуры воды, солёности и концентрации хлорофилла *a*. Связь обилия зоопланктона с концентрацией хлорофилла *a* непрямая и обусловлена, скорее всего, иными факторами, влияющими одновременно на оба сообщества – и зоопланктона, и фитопланктона. В то же время сообщество зоопланктона четко реагировало на аномально высокие значения концентрации фосфора резким снижением численности. Таким образом, антропогенное загрязнение, по всей видимости, является основной причиной отрицательных изменений в зоопланктоне. Дальнейшие исследования помогут глубже понять механизмы влияния загрязнения на зоопланктон.

Пока сложно говорить о межгодовых изменениях в районе исследований, так как период наблюдений охватывает только два года. Значимых изменений температуры воды, солёности и обилия зоопланктона в августе не выявлено, если не считать различий в распределении суммарного обилия зоопланктона. Таким образом, чтобы делать выводы о наличии или отсутствии межгодовых изменений, необходимо продолжать исследования. Более подробное исследование межгодовых изменений планируется провести в дальнейшем, после дополнительных экспедиций.

Обращает на себя внимание высокая численность вида-вселенца *Eurytemora americana* в бухте Благополучия в летний период, что указывает на высокий инвазионный потенциал данного вида при заселении сходных биоценозов в Белом море.

Автор выражает благодарность сотрудникам КарНЦ РАН Р. Э. Здорovenнову и Н. Е. Галахиной за предоставленные гидрологические и гидрохимические данные.

Литература

Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Толстиков А. В., Новикова Ю. С., Богданов С. Р. Лукина Ю. Н. Гидрофизические характеристики морской среды в бухте Благополучия (Соловецкие острова, Белое море): оценка на основе экспедиционных исследований в апреле 2025 года // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 39–56. doi: 10.17076/lim2118

Зубаха М. А., Усов Н. В. Температурные оптимумы массовых видов зоопланктона Белого моря // Биология моря. 2004. Т. 30, № 5. С. 347–351.

Инструкция по сбору и обработке планктона / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т морского рыбного хоз-ва и океанографии (ВНИРО). Отд. науч.-техн. информации. М.: ВНИРО, 1971. 82 с.

Калинкина Н. М., Галахина Н. Е., Костромин Е. А., Усов Н. В., Сластина Ю. Л. Трофический статус бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в летний период 2024 г. // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15, № 4. С. 592–604. doi: 10.25283/2223-4594-2025-4-592-604

Косообокова К. Н., Перцова Н. М. Зоопланктон Белого моря: структура, динамика, экология // Система Белого моря. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Ред. А. П. Лисицын. Т. II. М.: Научный мир, 2012. С. 640–674.

Лочия Белого моря. Л.: Мин. обороны СССР, ГУНиО, 1983. № 4766. 344 с.

Лукина Ю. Н., Здоровеннов Р. Э., Толстиков А. В., Галахина Н. Е., Богданов С. Р., Сабылина А. В., Здоровеннова Г. Э. Особенности гидродинамического и гидрохимического режимов бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в августе 2024 г. // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15, № 2. С. 287–299. doi: 10.25283/2223-4594-2025-2-287-299

Определитель фауны и флоры северных морей СССР / Ред. Н. С. Гаевская. М.: Советская наука, 1948. 737 с.

Прыгункова Р. В. Некоторые особенности сезонного развития зоопланктона губы Чупа Белого моря // Исследование фауны морей. Т. 13(21). Л.: Наука, 1974. С. 56–64.

Прыгункова Р. В. Различия в смене биологических сезонов в планктоне губы Чупа (Белое море) в разные годы // Исследование фауны морей. Т. 31(39). Л.: Наука, 1985. С. 99–108.

РД 52.24.387-2006. Массовая концентрация фосфора общего в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия. Ростов-на-Дону, 2006. 27 с.

Сухих Н. М., Усов Н. В. Инвазия в Белом море: первый случай обнаружения американского рачка *Eurytemora americana* (Copepoda, Calanoida) // Арктика: экология и экономика. 2026. Т. 16, № 3. С. 466–474. doi: 10.25283/2223-4594-2026-3-466-474

Шувалов В. С. Сезонная изменчивость размеров и некоторые особенности биологии *Oithona similis* Claus (Copepoda, Cyclopoida) в Белом море (Кандалакшский залив) // Океанология. 1965. Т. 5, вып. 2. С. 338–347.

Arnold S. R., Law K. S., Brock C. A., Thomas J. L., Starkweather S. M., von Salzen K., Stohl A., Sharma S., Lund M. T., Flanner M. G., Petäjä T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J. E., Melamed M., Johnson N., Fidel M., Tynkkynen V.-P., Baklanov A., Eckhardt S., Monks S. A., Browse J., Bozem H. Arctic air pollution: challenges and opportunities for the next decade // Elementa: Science of the Anthropocene. 2016. Vol. 4. Art. 000104. doi: 10.12952/journal.elementa.000104

Bartsch A., Pointner G., Efimova A., Jakober D., Ley S., Höglström E., Schweitzer P., Nitze I., Grosse G. Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. Art. 115013. doi: 10.1088/1748-9326/ac3176

Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space // Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change. 2014. Vol. 5, no. 3. P. 389–409. doi: 10.1002/wcc.277.2014, 5,389–409

Determination of photosynthetic pigments in sea waters. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. Paris: UNESCO, 1966. 69 p. doi: 10.25607/OBP-1940

Eriksen E., Husson B., Skaret G., Ingvaldsen R. B., Dalpadado P., Johannesen E., Jørgensen L. L., Bogstad B., Dolgov A. V., Prozorkevich D. V., Prokhorova T. A., Russkikh A. A., Strelkova N. A., Trofimov A. G., Prokopchuk I. P., Filin A. A. The living Barents Sea response to peak-warming and subsequent cooling // Sci. Rep. 2025. Vol. 15. Art. 13008. doi: 10.1038/s41598-025-96964-x

Falardeau M., Bennett E. M. Towards integrated knowledge of climate change in Arctic marine systems: A systematic literature review of multidisciplinary research // Arctic Science. 2020. Vol. 6, no. 1. P. 1–23. doi: 10.1139/AS-2019-0006

Gieskes W. W. C. Ecology of the Cladocera of the North Atlantic and the North Sea, 1960–1967 // Neth. J. Sea Res. 1971. Vol. 5, no. 3. P. 342–376. doi: 10.1016/0077-7579(71)90017-2

Grebmeier J. M. Shifting patterns of life in the Pacific Arctic and sub-Arctic seas // Ann. Rev. Marine Sci. 2012. Vol. 4. P. 63–78. doi: 10.1146/annurev-marine-120710-100926

Holmes R. M., Peterson B. J., Gordeev V. V., Zhulidov A. V., Meybeck M., Lammers R. B., Vörösmarty C. J. Flux of nutrients from Russian rivers to the Arctic Ocean: can we establish a baseline against which to judge future changes? // Water Resour. Res. 2000. Vol. 36, no. 8. P. 2309–2320. doi: 10.1029/2000WR900099

Huntington H. P., Danielson S. L., Wiese F. K., Baker M., Boveng P., Citta J. J., De Robertis A., Dickson D. M. S., Farley E., George J. C., Iken K., Kimmel D. G., Kuletz K., Ladd C., Levine R., Quakenbush L., Stabeno P., Stafford K. M., Stockwell D., Wilson Ch. Evidence suggests potential transformation of the Pacific Arctic ecosystem is underway // Nat. Clim. Change. 2020. Vol. 10. P. 342–348. doi: 10.1038/s41558-020-0695-2

Kirdyanov A. V., Krusic P. J., Piermattei A., Büntgen U., Shishov V. V., Vaganov E. A., Korets M. A., Mashukov D. A., Onuchin A. A., Pimenov A. V., Prokushkin A. S., Ryzhkova V. A., Shishikin A. S., Fertikov A. I., Knorre A. A., Ilyin V. A., Myglan V. S., Barinov V. V., Taynik A. V., Browse J., Esper J., Kukarskikh V. V., Smith K. T., Wild M., Zorita E. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution // Ecol. Lett. 2020. Vol. 23, no. 12. P. 1827–1837. doi: 10.1111/ele.13611

Letcher R. J., Verreault J., Bustnes J. O., Dietz R., Sonne C., Jenssen B. M., Jørgensen E. H., Vijayan M. M., Gabrielsen G. W. Exposure and effects assessment of persistent organohalogen contaminants in Arctic wildlife and fish // Sci. Total Environ. 2010.

Vol. 408, no. 15. P. 2995–3043. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.038

Lind S., Ingvaldsen R. B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // *Nat. Clim. Change*. 2018. Vol. 8, P. 634–639. doi: 10.1038/s41558-018-0205-y

Poggensee E., Lenz J. On the population dynamics of two brackish-water Cladocera *Podon leuckarti* and *Evadne nordmanni* in Kiel Fjord // *Kieler Meeresforschungen – Sonderheft*. 1981. Vol. 5. P. 268–273.

Razouls C., Desreumaux N., Kouwenberg J., de Bovée F. Biodiversity of Marine Planktonic Copepods (morphology, geographical distribution and biological data). Sorbonne University, CNRS, 2005–2026 [Электронный ресурс]. URL: <http://copepodes.obs-banyuls.fr/> (дата обращения: 05.05.2026).

Sun L., Perlwitz J., Hoerling M. What caused the recent 'Warm Arctic, cold continents' trend pattern in winter temperatures? // *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43, no. 10. P. 5345–5352. doi: 10.1002/2016GL069024

Usov N., Kutcheva I., Primakov I., Martynova D. Every species is good in its season: Do the shifts in the annual temperature dynamics affect the phenology of the zooplankton species in the White Sea? // *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 706. P. 11–33. doi: 10.1007/s10750-012-1435-z

WoRMS Editorial Board 2026. World Register of Marine Species [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marinespecies.org> (дата обращения: 05.05.2026).

Zhang J., Steele M., Spitz Y. H., Ashjian C., Campbell R., Berline L., Matrai P. Modeling the impact of declining sea ice on the Arctic marine planktonic ecosystem // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2010. Vol. 115, no. 10. Art. 10015. doi: 10.1029/2009JC005387

References

Arnold S. R., Law K. S., Brock C. A., Thomas J. L., Starkweather S. M., von Salzen K., Stohl A., Sharma S., Lund M. T., Flanner M. G., Petäjä T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J. E., Melamed M., Johnson N., Fidel M., Tynkkynen V.-P., Baklanov A., Eckhardt S., Monks S. A., Browse J., Bozem H. Arctic air pollution: challenges and opportunities for the next decade. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2016;4:000104. doi: 10.12952/journal.elementa.000104

Bartsch A., Pointner G., Efimova A., Jakober D., Ley S., Högström E., Schweitzer P., Nitze I., Grosse G. Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts. *Environ. Res. Lett.* 2021; 16:115013. doi: 10.1088/1748-9326/ac3176

Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*. 2014;5(3):389–409. doi: 10.1002/wcc.277. 2014,5,389–409

Determination of photosynthetic pigments in sea waters. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. Paris: UNESCO, 1966. 69 p. doi: 10.25607/OBP-1940

Eriksen E., Husson B., Skaret G., Ingvaldsen R. B., Dalpadado P., Johannesen E., Jørgensen L. L., Bogstad B., Dolgov A. V., Prozorkevich D. V., Prokhorova T. A., Russkikh A. A., Strelkova N. A., Trofimov A. G., Prokopchuk I. P., Filin A. A. The living Barents Sea

response to peak-warming and subsequent cooling. *Sci. Rep.* 2025;15:13008. doi: 10.1038/s41598-025-96964-x

Falardeau M., Bennett E. M. Towards integrated knowledge of climate change in Arctic marine systems: A systematic literature review of multidisciplinary research. *Arctic Science*. 2020;6(1):1–23. doi: 10.1139/AS-2019-0006

Gaevskaya N. S. (ed.). A key to fauna and flora of the northern seas of the USSR. Moscow: Sovetskaya nauka; 1948. 737 p. (In Russ.)

Gieskes W. W. C. Ecology of the Cladocera of the North Atlantic and the North Sea, 1960–1967. *Neth. J. Sea Res.* 1971;5(3):342–376. doi: 10.1016/0077-7579(71)90017-2

Grebmeier J. M. Shifting patterns of life in the Pacific Arctic and sub-Arctic seas. *Ann. Rev. Marine Sci.* 2012;4:63–78. doi: 10.1146/annurev-marine-120710-100926

Holmes R. M., Peterson B. J., Gordeev V. V., Zhulidov A. V., Meybeck M., Lammers R. B., Vörösmarty C. J. Flux of nutrients from Russian rivers to the Arctic ocean: can we establish a baseline against which to judge future changes? *Water Resour. Res.* 2000;36(8):2309–2320. doi: 10.1029/2000WR900099

Huntington H. P., Danielson S. L., Wiese F. K., Baker M., Boveng P., Citta J. J., De Robertis A., Dickson D. M. S., Farley E., George J. C., Iken K., Kimmel D. G., Kuletz K., Ladd C., Levine R., Quakenbush L., Stabeno P., Stafford K. M., Stockwell D., Wilson Ch. Evidence suggests potential transformation of the Pacific Arctic ecosystem is underway. *Nat. Clim. Change*. 2020;10:342–348. doi: 10.1038/s41558-020-0695-2

Instructions on zooplankton sampling and sample processing. Moscow: VNIRO; 1971. 82 p. (In Russ.)

Kalinkina N. M., Galakhina N. E., Kostromin E. A., Usov N. V., Slastina Yu. L. Trophic status of Blagopoluchiya Bay (the Solovetsky Archipelago of the White Sea) in the summer of 2024. *Arktika: ehkologiya i ehkonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2025;15(4): 592–604. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2025-4-592-604

Kirdyanov A. V., Krusic P. J., Piermattei A., Büntgen U., Shishov V. V., Vaganov E. A., Korets M. A., Mashukov D. A., Onuchin A. A., Pimenov A. V., Prokushkin A. S., Ryzhkova V. A., Shishikin A. S., Fertikov A. I., Knorre A. A., Ilyin V. A., Myglan V. S., Barinov V. V., Taynik A. V., Browse J., Esper J., Kukarskikh V. V., Smith K. T., Wild M., Zorita E. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution. *Ecol. Lett.* 2020;23(12):1827–1837. doi: 10.1111/ele.13611

Kosobokova K. N., Pertsova N. M. Zooplankton of the White Sea: structure, dynamics, ecology. *Sistema Belogo morya. Vodnaya tolshcha i vzaimodeistviyushchie s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera = The system of the White Sea. Water column and atmosphere, cryosphere, river discharge and biosphere interacting with it*. Vol. II. Moscow: Nauchnyi mir; 2012. P. 640–674. (In Russ.)

Letcher R. J., Verreault J., Bustnes J. O., Dietz R., Sonne C., Jenssen B. M., Jørgensen E. H., Vijayan M. M., Gabrielsen G. W. Exposure and effects assessment of persistent organohalogen contaminants

in Arctic wildlife and fish. *Sci. Total Environ.* 2010;408(15): 2995–3043. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.038

Lind S., Ingvaldsen R. B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature Clim. Change.* 2018;8:634–639. doi: 10.1038/s41558-018-0205-y

Lukina J. N., Zdorovenov R. E., Tolstikov A. V., Galakhina N. E., Bogdanov S. R., Sabylina A. V., Zdorovenova G. E. Features of the hydrodynamic and hydrochemical states of Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands of the White Sea) in August 2024. *Arktika: ehkologiya i ehkonomika = Arctic: Ecology and Economy.* 2025;15(2):287–299. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2025-2-287-299

Poggensee E., Lenz J. On the population dynamics of two brackish-water Cladocera *Podon leuckarti* and *Evadne nordmanni* in Kiel Fjord. *Kieler Meeresforschungen – Sonderheft.* 1981;5:268–273.

Prygunkova R. V. Differences in terms of biological seasons of zooplankton in Chupa inlet (the White sea) in different years. *Issledovanie fauny morei = Explorations of the fauna of seas.* Vol. 31(39). Leningrad: Nauka; 1985. P. 99–108. (In Russ.)

Prygunkova R. V. Some peculiarities of seasonal development of zooplankton in Chupa inlet of the White Sea. *Issledovanie fauny morei = Explorations of the fauna of seas.* Vol. 13(21). Leningrad: Nauka; 1974. P. 4–55. (In Russ.)

Razouls C., Desreumaux N., Kouwenberg J. de Bo-vée F. Biodiversity of Marine Planktonic Copepods (morphology, geographical distribution and biological data). Sorbonne University, CNRS, 2005–2026. URL: <http://copepodes.obs-banyuls.fr/> (accessed: 05.05.2026).

RD 52.24.387-2006. Mass concentration of total phosphorus in waters. Methodology for performing measurements by photometric method after oxidation with potassium persulfate. Rostov-on-Don; 2006. 27 p. (In Russ.)

Sailing directions of the White Sea. Leningrad: Min. oborony SSSR, GUNiO; 1983. No. 4766. 344 p. (In Russ.)

Shuvalov V. S. Seasonal variability of size and some features of biology of *Oithona similis* Claus (Copepoda, Cyclopoida) in the White Sea (Kandalaksha Bay). *Oceanologiya = Oceanology.* 1965;5(2):338–347. (In Russ.)

Sukhikh N. M., Usov N. V. Invasion in the White Sea: the first discovery of the American copepod *Eurytemora americana* (Copepoda, Calanoida). *Arktika: ehkologiya i ehkonomika = Arctic: Ecology and Economy.* 2026;16(3):466–474. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2026-3-466-474

Sun L., Perlwitz J., Hoerling M. What caused the recent 'Warm Arctic, cold continents' trend pattern in winter temperatures? *Geophys. Res. Lett.* 2016;43(10):5345–5352. doi: 10.1002/2016GL069024

Usov N., Kutcheva I., Primakov I., Martynova D. Every species is good in its season: Do the shifts in the annual temperature dynamics affect the phenology of the zooplankton species in the White Sea? *Hydrobiologia.* 2013;706:11–33. doi: 10.1007/s10750-012-1435-z
WoRMS Editorial Board 2026. World Register of Marine Species. URL: <https://www.marinespecies.org> (accessed: 05.05.2026).

Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Tolstikov A. V., Novikova Iu. S., Bogdanov S. R., Lukina J. N. Hydrophysical characteristics of the marine environment in Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands, White Sea): an assessment based on fieldwork in April 2025. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2025;6:39–56. (In Russ.). doi: 10.17076/lim2118

Zhang J., Steele M., Spitz Y. H., Ashjian C., Campbell R., Berline L., Matrai P. Modeling the impact of declining sea ice on the Arctic marine planktonic ecosystem. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2010;115(10):10015. doi: 10.1029/2009JC005387

Zubakha M. A., Usov N. V. Optimum temperatures for common zooplankton species in the White Sea. *Russian J. of Marine Biology.* 2004;30(5):293–297. doi: 10.1023/B:RUMB.0000046547.26708.3e

Поступила в редакцию / received: 20.05.2026; принята к публикации / accepted: 02.07.2026.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Усов Николай Викторович

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: Nikolay.Usov@zin.ru

CONTRIBUTOR:

Usov, Nikolay

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

УДК 574.472

ДОПОЛНЕНИЕ ЛИМНОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ВОДОЕМОВ О. ВАЛААМ ДАННЫМИ ОБ ИХТИОФАУНЕ

Г. Т. Поддубский*, Н. А. Гнездова, М. А. Гончарж, Н. В. Зуева**

Российский государственный гидрометеорологический университет
(ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007), *79046187649@yandex.ru,
**nady.zuyeva@ya.ru

Исследовано 8 из 11 озер о. Валаам, а именно: Лещевое, Никоновское, Крестовое, Сисяярви, Игуменское, Черное, Оссиёво, Германовское. Впервые проведены полевые ихтиологические работы на озерах Никоновском и Лещевом (июнь 2025 г.), дополнительно использованы опросные данные и фотографические материалы (2004–2026 гг.). Впервые описан видовой состав ихтиоценоза оз. Никоновского: выявлены обыкновенный карась (*Carassius carassius* (L., 1758)), серебряный карась (*C. auratus* (L., 1758)), верховка (*Leucaspius delineatus* (Heckel, 1843)). Подтверждено присутствие 6 видов рыб в оз. Лещевом и 3 видов в оз. Сисяярви. Проведено сопоставление ихтиологических типов озер с классификациями по макрофитам, планктону и абиотическим факторам. Показано, что данные об ихтиоценозе качественно дополняют лимнологическую характеристику водоемов, позволяя выделять больше градаций трофности и сапробности (например, дистрофное и гиперэвтрофное состояния), а также отражают долгосрочный статус экосистемы. Результаты применимы для развития системы биоиндикации малых озер Карелии и моделирования водных экосистем Валаамского архипелага.

Ключевые слова: видовой состав; ихтиоценоз; типы озер; рыбные сообщества; биоиндикация; Лещевое; Никоновское; Карелия

Для цитирования: Поддубский Г. Т., Гнездова Н. А., Гончарж М. А., Зуева Н. В. Дополнение лимнологической классификации водоемов о. Валаам данными об ихтиофауне // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 163–177. doi: 10.17076/lim2422

G. T. Poddubskiy*, N. A. Gnezdova, M. A. Goncharzh, N. V. Zueva**. SUPPLEMENTING THE LIMNOLOGICAL CLASSIFICATION OF VALAAM ISLAND LAKES WITH FISH FAUNA DATA

Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia), *79046187649@yandex.ru, **nady.zuyeva@ya.ru

In this study, 8 of the 11 lakes on Valaam Island were surveyed: Leshchevov, Nikonovskoe, Krestovoe, Sisjarvi, Igumenskoe, Chernoe, Ossievo, and Germanovskoe. Ichthyological fieldwork on lakes Nikonovskoe and Leschevov in June 2025 was the first effort of this kind for these lakes; additionally, interview data and photographic materials from

2004–2026 were used. The fish species composition in Lake Nikonovskoe was described for the first time: the common crucian carp (*Carassius carassius* (L., 1758)), the silver crucian carp (*C. auratus* (L., 1758)), and the sunbleak (*Leucaspius delineatus* (Heckel, 1843)) were identified. The presence of 6 fish species was confirmed for Lake Leschevoe, and 3 species for Lake Sisjarvi. The ichthyological types of the lakes were compared with classifications based on macrophytes, plankton, and abiotic factors. The results show that data on the fish community add qualitatively meaningful information to the limnological description of water bodies, allowing for a finer rating of trophicity and saprobity (e.g., dystrophic and hypereutrophic conditions) and reflecting the long-term status of the ecosystem. These results can be used to develop a bioindication system for small lakes of Karelia and to model aquatic ecosystems of the Valaam Archipelago.

Keywords: species composition; fish community; lake types; bioindication; Lake Leschevoe; Lake Nikonovskoe; Karelia

For citation: Poddubskiy G. T., Gnezdova N. A., Goncharzh M. A., Zueva N. V. Supplementing the limnological classification of Valaam Island lakes with fish fauna data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 163–177. doi: 10.17076/lim2422

Введение

Первое и единственное до настоящего времени ихтиологическое исследование озер о. Валаам проведено в 1977–1980 гг. Карельским филиалом АН СССР в рамках фаунистических исследований на 6 из 11 озер острова [Куликова и др., 1983]. Более 25 лет мониторинг экосистем внутренних озер Валаамского архипелага в сферах гидрохимии, гидробиологии, водной экологии ведется на учебно-научной станции «Валаам» Российского государственного гидрометеорологического университета (УНС «Валаам» РГГМУ) [Степанова и др., 2016, 2021а, б; Воякина, 2025], однако ихтиофауна не изучалась. Накопленные в ходе работы станции данные о видовом составе рыб никогда не публиковались. Настоящая статья представляет первое за последние 45 лет исследование рыбных сообществ внутренних озер о. Валаам, объединяющее данные 1970-х годов с современными. Таким образом, целью работы было дополнение лимнологической классификации озер о. Валаам.

Материалы и методы

Исследование проведено на о. Валаам в северной части Ладожского озера (Республика Карелия) на базе УНС «Валаам» РГГМУ. Географическими объектами исследования выступают 8 озер (рис. 1).

Это как проточные, так и изолированные озера, в соответствии с классификацией по площади водного зеркала [Иванов, 1948] – малые и очень малые, по местонахождению – лесные [Воякина, 2021] и болотные [Куликова и др.,

1983; Филатов и др., 2013] озера (табл. 1), высота расположения которых по уровню воды на 2,5–3 м выше уровня окружающего остров Ладожского озера [Степанова и др., 2021а].

Авторы проводили полевые исследования непосредственно на озерах Никоновском и Лещевом.

Никоновское озеро – небольшой лесной водоем округлой формы с низкими заболоченными берегами [Куликова и др., 1983]. Площадь озера составляет около 1,2 га, глубина не превышает 3,5 м, озеро имеет не прогреваемый выше 5,4 °С гипolimнион толщиной 2,5 м, где образуются заморные и сероводородные зоны [Степанова и др., 2021б]. Озеро Никоновское соединено с Ладожским непостоянной искусственной протокой («р. Кедрон» на туристических картах), которая регулирует уровень озера. В южной части в оз. Никоновское впадает безымянная протока, представляющая собой дренажную канаву [Степанова и др., 2016].

Лещевое озеро – второй по величине водоем острова после оз. Сисяярви, с которым Лещевое соединено протокой («р. Иордан» на туристических картах), нередко пересыхающей в маловодные годы [Чернышев и др., 2020; Степанова и др., 2021б]. Имеет трехлопастную форму, включая, соответственно, три залива [Чернышев и др., 2020]. Полевые работы велись в северо-западном и южном. Максимальная глубина достигает 7,5 м в северо-восточном заливе, при этом средняя глубина невелика, она составляет 2 м [Чернышев и др., 2020]. Площадь зеркала в среднем равна 0,24 км². Она, как и проточность оз. Лещевого, сильно зависит от уровня воды в Ладожском озере. В годы подъема уровня оз. Лещевое увеличивает площадь

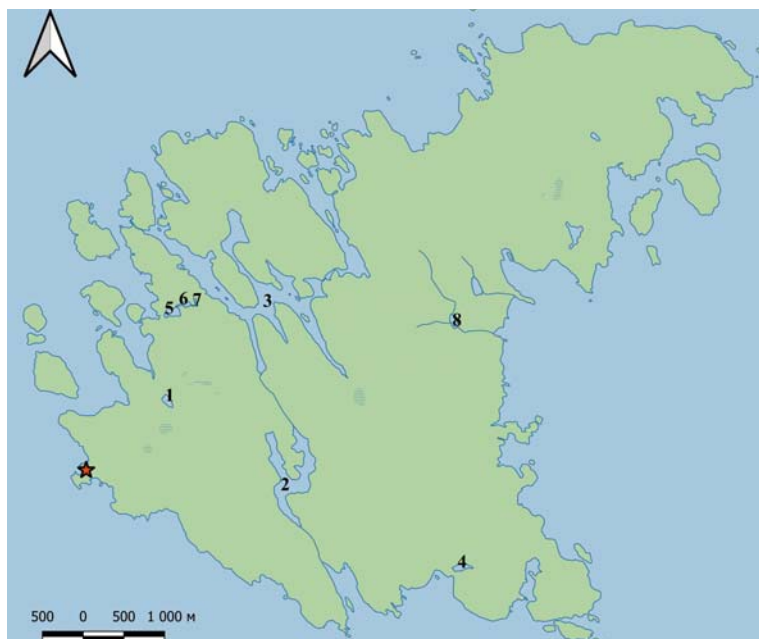


Рис. 1. Расположение исследуемых озер о. Валаам: 1 – Никоновское, 2 – Лещевое, 3 – Сисяярви, 4 – Крестовое, 5 – Игуменское, 6 – Черное, 7 – Оссииво, 8 – Германовское. Звездочкой отмечена УНС «Валаам» РГГМУ

Fig. 1. Location of the studied lakes on Valaam Island: 1 – Nikonovskoe, 2 – Leshchevov, 3 – Sisjarvi, 4 – Krestovoe, 5 – Igumenskoe, 6 – Chernoe, 7 – Ossievo, 8 – Germanovskoe. The Valaam Research Station of RSHU is marked with an asterisk

Таблица 1. Исследованные озера

Table 1. Studied lakes

Название озера, приведенное в статье Lake names as in body text		Другие названия ¹ Other names ¹	Описание ² Description ²
Сисяярви Sisjarvi		Сисъярви, Сисъярви Sisjärvi	Малое озеро, слабопроточное, связано с Ладогой, соединено протокой с оз. Лещевым Small low-flushing lake; connected to Lake Ladoga and linked by a channel to Lake Leshchevov
Лещевое Leshchevov		Глухое, Лещеванъярви Glukhoe, Lestshevonjärvi	Очень малое лесное озеро, слабопроточное, соединено протокой с оз. Сисяярви и Ладогой Very small forest low-flushing lake; linked by a channel to Lake Sisjarvi and Lake Ladoga
Крестовое Krestovoe		Хирмулампи Hirmulampi	Очень малое лесное болотное озеро, бессточное Very small forest mire lake; endorheic
Коневские Konevskie	Игуменское Igumenskoe	Коневское I Konevskoe I	Очень малое лесное озеро, соединено протокой с оз. Черным Very small forest lake, connected by a channel to Lake Chernoe
	Черное Chernoe	Мустоярви, Коневское II Mustoyarvi, Konevskoe II	Очень малое лесное озеро, соединено протоками с озерами Игуменским и Оссиивым Very small forest lake, connected by channels to Lakes Igumenskoe and Ossievo
	Оссииво Ossievo	Коневское III Konevskoe III	Очень малое лесное озеро, соединено протокой с оз. Черным Very small forest lake, connected by a channel to Lake Chernoe
Никоновское Nikonovskoe		Никканялампи Niikkanlampi	Очень малое лесное болотное озеро, соединено осушительной канавой с Ладогой Very small forest mire lake, connected by a drainage ditch to Lake Ladoga
Германовское Germanovskoe		Херманилампи Hermaninlampi	Очень малое лесное болотное озеро, бессточное Very small forest mire lake; endorheic

Примечание. Данные по: ¹[Куликова и др., 1983; Степанова, 1998; Степанова и др., 2021б], ²[Иванов, 1948; Куликова и др., 1983; Филатов и др., 2013; Степанова и др., 2016; Воякина, 2017].

Note. Sources: ¹[Kulikova et al., 1983; Stepanova, 1998; Stepanova et al., 2021b], ²[Ivanov, 1948; Kulikova et al., 1983; Filatov et al., 2013; Stepanova et al., 2016; Voyakina, 2017].

до 1,5 раза и становится более проточным, в годы с низким уровнем протока между оз. Лещевым и Лещевым заливом Ладоги пересыхает [Чернышев и др., 2020; Степанова и др., 2021б].

Ихтиологические данные на озерах Лещевом и Никоновском собирали в последнюю декаду июня 2025 г. Вылов производили крючковыми орудиями любительского лова. Полный биологический анализ и определение возраста рыб выполняли в соответствии с общепринятой методикой [Чугунова, 1959]. Видовую принадлежность рыб устанавливали по определителю [Борисов, Овсянников, 1954]. Встречи рыб фиксировали с помощью смартфонов и фотоаппарата для съемки под водой Nikon Coolpix S33. Кроме того, авторы собрали и проанализировали фотоснимки рыб, сделанные студентами, сотрудниками и посетителями станции, а также опросные данные об уловах: фотографии для оз. Никоновского (за 2014, 2019, 2022 и 2025 гг.), оз. Лещевого (2004, 2022–2025 гг.), оз. Сисяярви (2024–2026 гг.), устную информацию для оз. Германовского. Ихтиологические данные по Коневским озерам и оз. Крестовому взяли из литературы [Куликова и др., 1983].

Для всех рассматриваемых в работе озер вычисляли индексы сапробности по Пантле и Букку [Макрушин, 1974; Кокин, 1982]. Для расчетов использовали литературные данные о сообществах фитопланктона [Воякина, 2021] и зоопланктона [Степанова, 1998]. Для сравнения результатов, полученных разными вариантами расчета индекса сапробности, применяли критерий Стьюдента (t-статистика) и коэффициент корреляции Спирмена.

Опубликованные материалы о макрофитах [Зуева, 2010; Вуенано, Зуева, 2023] и рыбах [Куликова и др., 1983] дополнены авторами, включая данные по видовому составу рыб оз. Никоновского и Германовского, макрофитов оз. Сисяярви, Лещевого и Германовского.

Для сопоставления лимнологических классификаций по абиотическим факторам с полученной в ходе работы ихтиологической классификацией брали многолетние значения за период 1998–2014 гг. следующих лимнологических показателей [Воякина, 2017]: площадь зеркала, максимальная глубина, прозрачность по диску Секки, диапазон колебания pH, диапазон электропроводности, диапазон цветности по Pt-Co-шкале, содержание растворенного в воде органического вещества (оцененное методом перманганатной окисляемости). Классификацию проводили кластерным анализом по методу Уорда (метрика: евклидово расстояние) по крайним и средним значениям, стандартизированным по формуле:

$$x_{\text{standart}} = (x_i - \bar{x}) / \sigma,$$

где x_{standart} – стандартизированное значение; x_i – нестандартизированное (абсолютное) значение; $\bar{x}$ – среднее значение; σ – стандартное отклонение.

Результаты обрабатывали в пакетах Microsoft Excel 2016 и PAST 4.09 [Hammer et al., 2001]. Дендрограммы строили в PAST 4.09 по методу Уорда (метрика: евклидово расстояние).

Результаты и обсуждение

При полевых работах на оз. Никоновском обнаружены два вида рыб: обыкновенный (золотой) карась (*Carassius carassius* (L., 1758)) – 7 экз. и верховка (*Leucaspis delineatus* (Heckel, 1843)) – 6 экз. Измеренные ихтиологические показатели обобщены в табл. 2.

По трем снимкам (2014, 2019 и 2022 гг.) идентифицирован третий вид рыб, населяющий оз. Никоновское, – серебряный карась (*Carassius auratus* (L., 1758)). Причем в 2022 г. были сделаны фотографии особей обоих видов карасей, что позволило четко различить их по характерным морфологическим признакам.

На оз. Лещевом выявили 4 вида рыб, из которых поймали представителей 3 видов: укляя (*Alburnus alburnus* (L., 1758)) – 1 экз., красноперка (*Scardinius erythrophthalmus* (L., 1758)) – 1 экз., окунь (*Perca fluviatilis* (L., 1758)) – 2 экз. Обнаружили, но не выловили молодую щуку (*Esox lucius* (L., 1758)), которую позже идентифицировали по подводной фотографии. Так как всего на оз. Лещевом выловили 4 экз., индивидуальные измерения приведены без обобщения (табл. 3).

По фотографиям уловов прошлых лет на оз. Лещевом идентифицированы: плотва (*Rutilus rutilus* (L., 1758)) (2022 г., 2 фото), красноперка (*S. erythrophthalmus*) (2022 г., 3 фото; 2024 г., 1 фото), окунь (*P. fluviatilis*) (2022 г., 3 фото; 2025 г., 1 фото), щука (*E. lucius*) (2023 г., 1 фото), лещ (*Abramis brama* (L., 1758)) (2004 г., 1 фото).

На оз. Сисяярви местные жители добывают для собственного потребления окуня и щуку, что подтверждается фотографическим материалом за разные годы. По одной фотографии любительского улова 2026 г. идентифицировали плотву.

На оз. Германовском, по устным сообщениям, вылавливали только окуня.

Собранные в текущей работе данные по оз. Лещевому (2022–2025 гг.) в целом подтверждают описанный в 1970-х годах таксономический состав ихтиоценоза [Куликова и др., 1983]. Вероятно, низкий улов на оз. Лещевом в июне 2025 г. можно объяснить вхождением последней

Таблица 2. Характеристики улова в оз. Никоновском, 2025 г.

Table 2. Characteristics of the catch in Lake Nikonovskoe, 2025

Характеристика Characteristics	<i>C. carassius</i>	<i>L. delineatus</i>
Зоологическая длина, см Total length, cm	<u>14,5–17,5</u> 15,9	<u>6–7,9</u> 7,4
Длина тела, см Standard length, cm	<u>12,3–14,5</u> 13,2	<u>5,3–6,8</u> 6,2
Высота тела, см Body depth, cm	<u>5–6,4</u> 5,4	<u>1,2–1,5</u> 1,3
Полная масса, г Whole body wet weight, g	<u>61,1–104,3</u> 78,2	<u>2–3,9</u> 3
Масса тушки, г Body wet weight without internal organs, g	<u>54,9–104,3</u> 70,8	<u>1,6–3</u> 2,5
Масса гонад, г Gonad weight, g	<u>2,4–5,5</u> 4	0,4*
Коэффициент Фультон Fulton's condition factor	<u>2,85–3,94</u> 3,37	<u>0,95–1,42</u> 1,34
Стадия зрелости Gonad maturation stage	<u>III–IV</u> IV	<u>III–VI</u> IV
Соотношение полов ♀:♂:juv. Sex ratio ♀:♂:juv.	1:0:0	4:1:0
Возраст, лет Age, years	<u>2+ – 3+</u> 3+	<u>2+ – 3+</u> 3+
Количество, экз. Number, specimens	7	6
Длительность вылова, ч Fishing duration, hours	12	3

Примечание. В ячейках над дробной чертой записаны диапазоны минимум–максимум, под дробной чертой – медиана (для строки «Возраст» указана мода); *масса гонад только одной верховки была выше порога чувствительности весов 0,2 г.

Note. Min–max ranges are given above fraction bar; median (the mode for the “Age” row) – below the fraction bar; *gonad weight of only one sunbleak exceeded the balance’s sensitivity threshold of 0.2 g.

Таблица 3. Характеристики улова в оз. Лещевом, 2025 г.

Table 3. Characteristics of the catch in Lake Leshchevov, 2025

Характеристика Characteristics	<i>P. fluviatilis</i> (1)	<i>P. fluviatilis</i> (2)	<i>A. alburnus</i>	<i>S. erythrophthalmus</i>
Зоологическая длина, см Total length, cm	12,1	15,7	12,0	15,8
Длина тела, см Standard length, cm	10,6	13,2	10	13,1
Высота тела, см Body depth, cm	2,4	3,3	2,3	4,2
Полная масса, г Whole body wet weight, g	21,9	45,5	11,2	45,5
Масса тушки, г Body wet weight without internal organs, g	20,4	41,7	8,7	40,7
Масса гонад, г Gonad weight, g	*	*	**	1,6
Коэффициент Фультон Fulton's condition factor	1,84	1,98	1,12	2,02
Возраст, лет Age, years	1+	2+	1+	3+

Примечание. *Пойманные окуни были ювенильными особями; **массу гонад уклей не зафиксировали, так как почти вся брюшная полость рыбы была занята паразитическим ленточным червем, а внутренние органы находились в крайне истощенном состоянии.

Note. *Captured perch were juveniles; **the gonad weight of *A. alburnus* was not measured, since almost the entire abdominal cavity was occupied by parasitic tapeworm, and the internal organs were severely atrophied.

декады июня в нерестовый период. Об этом свидетельствует тот факт, что обычно обильная в июльских уловах красноперка попала только единожды за сутки и при этом носила зрелую икру. Также в пользу этого предположения говорит поимка единственной уклей, пораженной гельминтозом. Вероятно, голод, как следствие истощения, и стал причиной ее поимки в единственном экземпляре, в то время как остальные уклей не проявили интереса к наживке, что также может свидетельствовать о нересте.

Присутствие в уловах из оз. Германовского только окуня не исключает наличия в составе ихтиоценоза других видов. Тем не менее можно предположить, что окунь – наиболее массовый вид для этого водоема, из чего следует принадлежность озера к типу, где доминирует окунь [Китаев, 2007]. Если учесть, что оз. Германовское – ацидный мезотрофный водоем с низкой степенью зарастания, водосбор которого представлен верховым болотом [Воякина, 2017], то с большой вероятностью оно принадлежит непосредственно к окуневому типу. Это озеро полностью соответствует картине «окна в болотах», которой В. К. Лесненко описывает дистрофные озера окуневого типа [Лесненко, Абросов, 1973].

Для более полной картины ихтиологической информации проведено сопоставление полученных в ходе работы данных с материалами работы экспедиции Карельского филиала АН СССР 1977–1980 гг. [Куликова и др., 1983]. Оз. Лещевое и тогда, и в настоящее время имеет наиболее разнообразную ихтиофауну среди валаамских озер, вследствие чего по нему было собрано наибольшее количество ихтиологических данных. Известно, что лещ приходил на нерест в оз. Лещевое из Ладожского озера в первой половине июля [там же]. Линь (*Tinca tinca* (L., 1758)), который во всей Карелии считается редким видом и обитает только в водоемах Приладожья, встречался в оз. Лещевом с той же частотой, что и лещ, и, возможно, обитает в озере постоянно в связи с подходящими условиями среды [там же]. Окунь, как и в настоящее время, был представлен формой, называемой травяным окунем, сосредоточенной в прибрежных зарослях и отличающейся высокой численностью и тугорослостью [там же]. Так как в оз. Лещевом большинство видов рыб бентоядны, в 1977–1980 гг. высказывалось предположение, что главный фактор замедленного роста рыб в озере – пищевая конкуренция, от которой свободны только уклей и щука [там же]. Но это не согласуется с тугорослостью окуня и, скорее всего, вызвано внешними условиями среды, например, недостаточным количеством градусодней в году. Этот вопрос в дальнейшем требует

более детального изучения. Сопоставление данных о видовом составе представлено в табл. 4.

Ихтиофауна внутренних озер Валаама включает как распространенные повсеместно эврибионтные виды, так и виды, нехарактерные для Карелии. Из числа эврибионтных видов представлены: плотва, уклей, окунь, ерш, щука и трехиглая колюшка (*Gasterosteus aculeatus* (L., 1758)), которая в ходе исследования не отмечена, так как на оз. Крестовом полевых работ не проводилось. К нехарактерным относятся виды волго-каспийского комплекса: линь, карась, красноперка, густера [Куликова и др., 1983; Лукин и др., 2013]. Наличие последних, вероятнее всего, связано с повышенным поступлением органики, высокой цветностью и пониженной прозрачностью валаамских озер по сравнению с соразмерными карельскими озерами [Рыжков и др., 2012; Степанова и др., 2021a]. Поэтому к валаамским озерам можно применить закономерности, которые выявили при изучении озер южной части Северо-Западного региона. Так, в настоящей работе использовали данные по ихтиологической типологии озер Псковской области [Лесненко, Абросов, 1973].

Целесообразно сравнить новые данные по измерениям рыб с известными литературными сведениями о популяциях видов-доминантов в озерах Крестовое и Лещевое [Куликова и др., 1983] (табл. 5). Ювенильные особи окуня, пойманные в июне 2025 г. в оз. Лещевом, по размеру были чуть меньше среднего окуня в уловах 1970-х гг. Красноперка из оз. Лещевого, судя по данным 1970-х гг., относится к наименьшей размерной группе, встречавшейся в озере. Самки карасей, пойманные в оз. Никоновском, по показателю длины сходны с крупными карасями из оз. Крестового. Тугорослых карасей, отмеченных в оз. Крестовом [Куликова и др., 1983], на оз. Никоновском не наблюдали. По имеющимся данным можно с осторожностью предположить, что самки карасей из оз. Крестового упитаннее самок карасей из оз. Никоновского, но достоверность данного факта и его причины можно выявить только при дальнейших исследованиях.

Ихтиоценоз – это полноценная характеристика озера, связанная с такими лимнологическими показателями, как трофность [Лесненко, Абросов, 1973], сапробность [Макрушин, 1974], биомасса фитопланктона, зоопланктона, бентоса и др. [Китаев, 2007]. Поэтому представляет интерес сопоставление ихтиологических данных по валаамским озерам с результатами их классификации на основе других лимнологических характеристик. Для объективного сопоставления сравнивали между собой результаты только классификаций, характеризующих

Таблица 4. Обобщение материалов по ихтиоценозам озер о. Валаам по результатам исследований АН СССР 1977–1980 гг. и уловам 2004–2026 гг.

Table 4. Summary of data on the ichthyocenoses of the lakes on Valaam Island based on the results of research by the Academy of Sciences of the USSR in 1977–1980 and catch records from 2004 to 2026

Состав ихтиоценоза, 1977–1980 гг. Species composition, 1977–1980	Характеристика ихтиоценоза, 1977–1980 гг. Ichthyocenosis description, 1977–1980	Выявленные виды, 2004–2026 гг. Identified species, 2004–2026	Виды, выявленные авторами работы, 2025 г. Species identified by the authors of the work, 2025
Конеvские озера: Игуменское, Черное, Оссиево Lakes Konevskie (Igumenskoe, Chernoe, Ossievo)			
Окунь, плотва, красноперка Perch, roach, common rudd	Мелкие, тугорослые особи, численность невелика Small, slow-growing specimens; population size is small	–	–
Крестовое Krestovoe			
Карась, уклея, язь, трехиглая колюшка Crucian carp, bleak, ide, three-spined stickleback	Доминанты: карась, уклея. Популяция карася имеет низкие темпы роста (максимум до 2 лет, минимум с 8 лет) Dominant species: crucian carp, bleak. The crucian carp population shows slow growth rates (maximum age of 2 years, minimum age of 8 years)	–	–
Лещевое Leshchevoe			
Красноперка, плотва, лещ, густера, линь, уклея, карась, окунь, ерш, щука Common rudd, roach, bream, silver bream, tench, bleak, crucian carp, perch, ruff, pike	Наибольшее разнообразие. Доминанты: плотва, красноперка, окунь, густера Greatest diversity. Dominant species: roach, common rudd, perch, silver bream	Плотва/roach (<i>R. rutilus</i>) ¹ , красноперка/common rudd (<i>S. erythrophthalmus</i>) ¹ , окунь/ perch (<i>P. fluviatilis</i>) ¹ , щука/ pike (<i>E. lucius</i>) ¹ , лещ/bream ¹ , ерш/ruff ³ , линь/tench ³	Уклея/bleak (<i>A. alburnus</i>) ² , красноперка/common rudd (<i>S. erythrophthalmus</i>) ² , окунь/perch (<i>P. fluviatilis</i>) ² , щука/pike (<i>E. lucius</i>) ¹
Никоновское Nikonovskoe			
–	–	Карась серебряный/silver crucian carp (<i>C. auratus</i>) ¹ , карась обыкновенный/ crucian carp (<i>C. carassius</i>) ¹	Карась обыкновенный/ crucian carp (<i>C. carassius</i>) ² , верховка/sunbleak (<i>L. delineatus</i>) ¹
Сисяярви Sisjarvi			
Красноперка, плотва, лещ, густера, линь, уклея, окунь, ерш, щука Common rudd, roach, bream, silver bream, tench, bleak, perch, ruff, pike	Наибольшая численность рыб Highest fish abundance	Окунь/perch (<i>P. fluviatilis</i>) ¹ , щука/pike (<i>E. lucius</i>) ¹ , плотва/roach (<i>R. rutilus</i>) ¹	–
Германовское Germanovskoe			
–	–	Окунь/perch ³	–

Примечание. Виды приведены по: ¹фотографическому материалу посетителей станции, монастырской службы и авторов работы, ²выловленным авторами экземплярам, ³устным свидетельствам. Латинское название приведено для видов, идентифицированных по определителю. Прочерк означает отсутствие наблюдений.

Note. Species are reported based on: ¹photographic material provided by station visitors, monastery staff, and the authors of this study; ²specimens collected by the authors; ³verbal accounts. Scientific names are provided for species identified using a taxonomic key. A dash indicates the absence of observations.

Таблица 5. Сводка ихтиологических данных по видам-доминантам озер Крестового и Лещевого по результатам исследований 1977–1980 гг.

Table 5. Summary of ichthyological data on dominant species in Lakes Krestovoe and Leshchevov based on research conducted in 1977–1980

Озеро Lake	Группа рыб Fish group	Длина*, см Length*, cm	Полная масса, г Whole body wet weight, g	Возраст, лет Age, years	♀:♂
Крестовое Krestovoe	Карась (самки) Crucian carp (female)	7,4–17,3 13,3	12,3–172 98	3–10 4–7	3,4:1
	Карась (самцы) Crucian carp (male)	9,4–14,9 12,7	24–119 70		
Лещевое Leshchevov	Плотва Roach	х–20 14,5	х–170 85	2–6 4–5	×
	Красноперка Common rudd	12–22 17	18,5–258 ×	х–8 4–5	5,7:1
	Густера Silver bream	9,8–15 ×	25–99 45	×	×
	Окунь Perch	х–20+ 15	×	х–9 ×	×

Примечание. В ячейках над дробной чертой приведены диапазоны минимум–максимум, под дробной чертой – среднее (в графе «возраст» – диапазон наиболее часто встречающихся в уловах возрастов), × – данные отсутствуют. *Длина была обозначена как «АД (макс. длина)» [Куликова и др., 1983] – речь либо о промысловой длине (АД) от кончика рыла до конца чешуйчатого покрова и начала хвостового плавника, в классических работах того времени принятая за основную длину [Чугунова, 1959], либо о полной, зоологической длине (АВ) от начала рыла до окончания хвостового плавника [там же].

Note. Min–max ranges are given above the fraction bar, and the mean below the bar (“Age” column shows the range of the most frequent ages in the catches); × – no data. *Length was designated as “AD (max. length)” [Kulikova et al., 1983]. This refers either to the commercial (standard) length (AD), measured from the tip of the snout to the posterior end of the scales (base of the caudal fin), which was considered the primary length metric in classic studies of that time [Chugunova, 1959], or to the total length (AB), measured from the tip of the snout to the end of the caudal fin [ibid.].

один и тот же лимнологический аспект водоема: сходство сообществ (табл. 6), трофность (табл. 7), сапробность (табл. 8).

Далее произвели сравнение по сообществам короткоциклового организма – фито- и зоопланктона; макрофитов с вегетацией весь летний сезон и продолжительностью жизни от одного года до нескольких лет; рыб с продолжительностью жизни, измеряемой годами. Предполагалось, что по этому принципу более индивидуальна будет характеристика озер по планктонным организмам, отражающим быструю динамику экосистемы, а наиболее обобщенная – по макрофитам и рыбам. Однако это предположение оправдалось лишь частично: озера Сисяярви и Германовское были обособлены по всем классификациям, так как оз. Сисяярви (лещево-уклейный тип) – наиболее связанный с Ладогой водоем острова [Степанова и др., 2021б], а оз. Германовское (окуневый тип) изолировано от остальных озер и имеет экстремально кислые условия [Воякина, 2021]. На оз. Лещевое, по текущему состоянию больше всего сходное с оз. Крестовым, повлияла связь с оз. Сисяярви и Ладогой, поэтому его историческое состояние и ихтиологический тип занимает промежуточное положение между оз. Сисяярви и внутренними озерами. Остальные озера, принадлежащие к плотвично-окуневому и карасевому типам, не имеют четкого

разделения по прочим классификациям, что, вероятно, указывает на сходство воздействующих на них в настоящее время факторов.

Чтобы проверить, вносят ли рыбы-индикаторы важный вклад в оценку состояния водоема, вычисляли индекс сапробности по Р. Пантле и Г. Букку (табл. 8), так как в этом индексе рыбам присвоены индикаторные числовые значения [Макрушин, 1974]. Проблема такой оценки заключается в невозможности посчитать индекс сапробности отдельно по рыбам: из 18 возможных рыб-индикаторов в валаамских озерах отмечено 1–5 видов, в то время как оптимальное количество видов-индикаторов для расчета индекса сапробности ≥ 12 [Шитиков и др., 2003]. Поэтому сравнивались два варианта расчета индекса: с рыбами и без рыб. Отсутствие рыб в выборке не произвело достоверных различий в результатах (t-статистика –0,39 не выходит за порог t критической 1,76), коэффициент корреляции Спирмена достоверно показал сильную прямую связь (0,98) между ними. Однако отсутствие рыб в выборке все же вносит неточность в оценку. Так, в случае валаамских озер показатель сапробности в целом занижается. Поэтому кажущийся незначительным вклад рыб в оценку водоема может сыграть важную роль при рассмотрении водоемов с большим разнообразием рыб, например, крупных озер Карелии, а также водоемов в переходных состояниях.

Таблица 6. Классификации валаамских озер по сходству сообществ
Table 6. Classifications of the Valaam lakes based on community similarity

Озеро Lake		Классификация по макрофитам ¹ Classification by macrophyte community ¹	Классификация по фитопланктону ² Classification by phytoplankton community ²	Классификация по зоопланктону ³ Classification by zooplankton community ³	Ихтиоло- гический тип ⁴ Ichthyological type ⁴
Сисяярви Sisjarvi		Заращение 5 %, 22 вида 5 % coverage, 22 species	Доминант: цианобактерии, дают пик численности. 2 пика биомассы: раннелетний (золотистые и диатомовые), осенний (цианобактерий и/или рафидофитовых) Dominant: cyanobacteria, which exhibit a population peak. Two biomass peaks: early summer (chrysophytes and diatoms) and autumn (cyanobacteria and/ or raphidophytes)	Холодноводное оксифильное сообщество, выровненная структура, максимальное разнообразие, высокая масса тела Cold-water oxyphilic community, even structure, maximum diversity, high body mass	Лещево- уклейный Bream-bleak
Лещевое Leshchevoo		Заращение 10–15 %, 48 видов 10–15 % coverage, 48 species	Доминант: цианобактерии, пик обилия в июле или сентябре Dominant: cyanobacteria, peak abundance in July or September	Высокие разнообразие и масса тела, выровненная структура High diversity and body mass, even structure	
Крестовое Krestovoo		Заращение 15 %, 11 видов 15 % coverage, 11 species		Доминант: изменчив. 1–2 пика: раннелетний (золотистые и диатомовые), осенний (цианобактерии и/или рафидофитовые) Dominant: variable. 1–2 peaks: early summer (chrysophytes and diatoms), autumn (cyanobacteria and/ or raphidophytes)	Низкие разнообразие и масса тела, доминанты: коловратки <i>Filinia</i> , <i>Brachionus</i> и седиментаторы Low diversity and body mass; dominant taxa: <i>Filinia</i> and <i>Brachionus</i> rotifers and sedimentators
Коневские Konevskie	Игуменское Igumenskoo	Заращение 10 %, 17–24 вида 10 % coverage, 17–24 species	Низкие разнообразие и масса тела, доминанты: коловратки <i>Kellicottia longispina</i> и седиментаторы Low diversity and body mass, dominant taxa: <i>Kellicottia</i> <i>longispina</i> rotifers and sedimentators		Плотвично- окуневый Roach-perch
	Черное Chernoo	Заращение 20 %, 17–25 видов 20 % coverage, 17–25 species			
	Оссиёво Ossievo	Заращение 45–50 %, 17–26 видов 45–50 % coverage, 17–26 species			
Никоновское Nikonovskoo		Заращение 20 %, 17–24 вида 20 % coverage, 17–24 species			Карасевый Crucian carp
Германовское Germanovskoo		Заращение 10 %, 9 видов 10 % coverage, 9 species	Доминант: хлорококковые, криптофитовые. Пик летом (хлорококковые) Dominant: Chlorococcales, cryptophytes. Summer peak (Chlorococcales)	Бедный состав, низкая масса тела Species-poor composition, low body mass	Окуневый Perch

Примечание. По: ¹[Зуева, 2010; Buenano, Zueva, 2023], ²[Воякина, 2007, 2021], ³[Степанова, 1998], ⁴[Лесненко, Абросов, 1973].

Note. Sources: ¹[Zueva, 2010; Buenano, Zueva, 2023], ²[Voyakina, 2007, 2021], ³[Stepanova, 1998], ⁴[Lesnenko, Abrosov, 1973].

Таблица 7. Классификации валаамских озер по уровню трофности

Table 7. Classifications of the Valaam lakes by trophic status

Озеро Lake		Трофность по скорости фотосинтеза ¹ Trophic status based on photosynthesis rate ¹	Трофность по ихтиологическому типу ² Trophic status based on ichthyological type ²
Коневские Konevskie	Игуменское Igumenskoe	Мезотрофное с чертами эвтрофии Mesotrophic with eutrophic characteristics	Эвтрофное Eutrophic
	Черное Chernoe		
	Оссиёво Ossievo		
Лещевое Leshchevoo			Мезотрофное Mesotrophic
Крестовое Krestovoo			
Сисяярви Sisjarvi		Мезотрофное Mesotrophic	
Никоновское Nikonovskoe		Эвтрофное Eutrophic	Гиперэвтрофное (дистрофицирующееся) Hypereutrophic (undergoing dystrophication)
Германовское Germanovskoe		Мезотрофное Mesotrophic	Дистрофное Dystrophic

Примечание. По: ¹[Воякина, 2017], ²[Лесненко, Абросов, 1973].

Note. Sources: ¹[Voyakina, 2017], ²[Lesnenko, Abrosov, 1973].

Таблица 8. Значения индекса сапробности валаамских озер

Table 8. Saprobic index values for the Valaam lakes

Озеро Lake		S _{РВ} по всем организм- индикаторам без рыб ¹ S _{РВ} based on all indicator organisms excluding fish ¹	S _{РВ} по всем организмам-индикаторам ¹ S _{РВ} based on all indicator organisms including fish ¹	ε	S
Коневские Konevskie	Игуменское Igumenskoe	1,89	1,89	0,00	β
	Черное Chernoe	1,97	1,96	0,01	β-α
	Оссиёво Ossievo	1,71	1,74	-0,03	β
Лещевое Leshchevoo		1,81	1,84	-0,03	β
Крестовое Krestovoo		2,18	2,25	-0,08	α
Никоновское Nikonovskoe		1,65	1,76	-0,11	β
Сисяярви Sisjarvi		1,60	1,64	-0,04	β
Германовское Germanovskoe		1,28	1,42	-0,14	β

Примечание. S_{РВ} – значение индекса по Пантле и Букку; S – зона сапробности; ε – ошибка при неучете вклада в значение индекса рыб; α – α-мезосапробная зона; β – β-мезосапробная зона; По: ¹[Макрушин, 1974; Кокин, 1982; Гальцова, Дмитриев, 2007].

Note. S_{РВ} – Pantle & Buck index value; S – saprobic zone; ε – error after excluding fish from index calculation; α – α-mesosaprobic zone; β – β-mesosaprobic zone; Sources: ¹[Makrushin, 1974; Kokin, 1982; Galtsova, Dmitriev, 2007].

Целесообразно сопоставить классификации по комплексам абиотических и биотических показателей. В нашем случае абиотическими показателями послужили многолетние данные мониторинга [Воякина, 2017], а биотическими – сообщество рыб, выраженное ихтиологическим типом озера. Дендрограммы разбиения на кластеры озер по значениям лимнологических показателей позволяют

продемонстрировать сходство и различие водоемов с разных сторон: по средним значениям – наиболее характерным условиям обитания (рис. 2, а) и крайним значениям – диапазонам экстремальной изменчивости условий (рис. 2, б). Чтобы сохранить это преимущество при сопоставлении с ихтиологической классификацией водоемов, использовался не один из вариантов кластеризации, а их синтез.

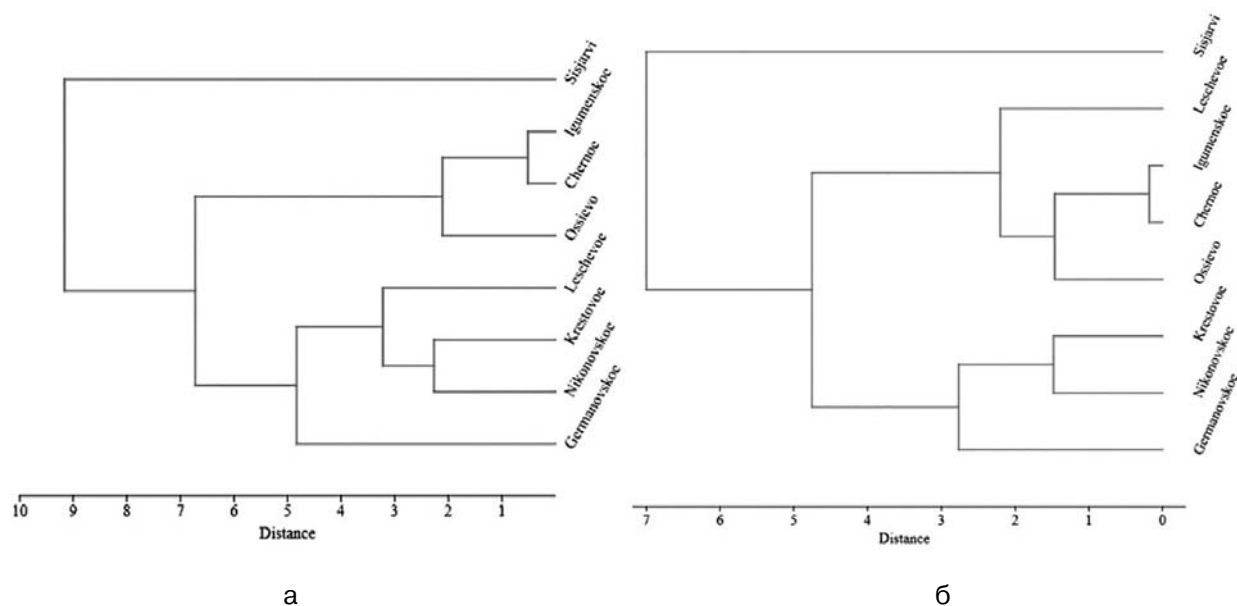


Рис. 2. Дендрограммы кластеризации восьми валаамских озер (метод Уорда, метрика Евклида): а – по крайним значениям абиотических факторов; б – по средним значениям абиотических факторов

Fig. 2. Cluster dendrograms of eight Valaam lakes (Ward's method, Euclidean distance): а – based on extreme values of abiotic factors; б – based on mean values of abiotic factors

В обоих вариантах в отдельные макрогруппы выделяются: 1) оз. Сисяярви, 2) Коневские озера, 3) оставшиеся озера-ламбы – Крестовое, Никоновское и Германовское. Различие вносит оз. Лещевое, в варианте классификации по крайним значениям приближенное к третьей группе, а по средним – к Коневским озерам. Оз. Германовское в обоих вариантах достаточно обособлено от остальных озер в группе. Таким образом, в отдельные группы по абиотическим факторам следует выделить: 1) оз. Сисяярви, 2) Коневские озера, 3) оз. Лещевое, которое занимает промежуточное положение между Коневскими и остальными очень малыми озерами, 4) озера-ламбы с выделением Германовского в отдельную подгруппу на основании большой дистанции от других озер группы в обоих вариантах классификации. Такое разбиение учитывает различия водоемов по типичным и нетипичным условиям обитания гидробионтов, а также отражает эмерджентные биотические свойства озер – характер продукционных процессов [Воякина, 2017], который тесно связан с типом ихтиоценоза [Китаев, 2007]. Таким образом, эту информацию необходимо учесть при сопоставлении полученных классов с классификацией по ихтиологическим типам (табл. 9). Также приведена классификация [Степанова и др., 2010] рассматриваемых валаамских озер по устоявшейся, разработанной для малых озер Карелии гидрохимической классификации

[Лозовик и др., 1991]. При сравнении с ней имеющихся данных становится видно, что при добавлении к гидрохимическим показателям других абиотических факторов (размерные характеристики, прозрачность) классификация лучше отражает наблюдаемые экологические различия: Крестовое и Лещевое озера, принадлежащие к одному гидрохимическому типу, относятся к разным кластерам.

Заключение

Впервые за последние 45 лет (с 1980 г.) проведено исследование ихтиофауны внутренних озер о. Валаам. Заполнены пробелы в изученности водоемов: впервые описан видовой состав ихтиоценоза оз. Никоновского (выявлены *Carassius carassius*, *C. auratus*, *Leucaspis delineatus*), отмечен факт обитания *Perca fluviatilis* в оз. Германовском. Подтверждено присутствие ряда видов в оз. Лещевом (*Alburnus alburnus*, *Scardinius erythrophthalmus*, *P. fluviatilis*, *Esox lucius*, *Rutilus rutilus*, *Abramis brama*, *Tinca tinca*) и в оз. Сисяярви (*P. fluviatilis*, *E. lucius*, *R. rutilus*).

Для карасей и верховки оз. Никоновского впервые получены значения коэффициента Фультона – это индивидуальная характеристика популяции, которая необходима для дальнейшего мониторинга и сопоставления его результатов с данными, полученными в других частях ареала.

Таблица 9. Сопоставление классификации валаамских озер по абиотическим лимнологическим показателям и ихтиологическому типу

Table 9. Comparison of classifications of the Valaam lakes based on abiotic limnological parameters and ichthyological type

Озеро Lake		Гидрохимический тип для малых озер Карелии ¹ Hydrochemical type for small lakes in Karelia ¹	Обобщенный результат кластеризации Generalized clustering result	Тип озера по ихтиоценозу Ichthyological type
Коневские Konevskie	Игуменское Igumenskoe	Нейтральные мезогумусные мезожелезистые с повышенным содержанием органики Neutral mesohumic, mesoferruginous, with elevated organic matter content	Высокая цветность, низкое содержание растворенной органики, стабильно очень высокая продукция, высокая скорость фотосинтеза High colour, low dissolved organic matter content, consistently very high productivity, high photosynthetic rate	Плотвично- окуневый Roach-perch
	Черное Chernoe			
	Оссиёво Ossievo	Нейтральные мезополигумусные мезополижелезистые с минерализацией 15–25 мг/л Neutral mesopolyhumic, mesopolyferruginous, with a mineralization of 15–25 mg/L		
Лещевое Leshchevoo	Высокая цветность, стабильно высокая продукция, высокая скорость фотосинтеза High colour, consistently high productivity, high photosynthetic rate		Лещево- уклейный Bream-bleak	
Крестовое Krestovoo	Минимальная прозрачность, очень высокая цветность, максимальное содержание растворенной органики, нестабильная продукция Minimal transparency, very high colour, maximum dissolved organic matter content, unstable production		Карасевый Crucian carp	
Никоновское Nikonovskoo		Нейтральные полигумусные мезополижелезистые с повышенным содержанием органики Neutral polyhumic, mesopolyferruginous with elevated organic matter content		
Германовское Germanovskoo		Ацидные полигумусные мезополижелезистые с минерализацией 10–15 мг/л Acidic polyhumic, mesopolyferruginous, with a mineralization of 10–15 mg/L	Максимальная кислотность, очень высокая цветность, высокое содержание растворенной органики, стабильно низкая продукция Maximum acidity, very high colour, high dissolved organic matter content, consistently low production	Окуневый Perch
Сисяярви Sisjarvi		Олигогумусный, нейтрально- олигощелочной водоем ² Oligohumic, neutral- to-oligoalkaline water body ²	Максимальные прозрачность и минерализация, средние цветность и содержание растворенной органики, стабильно низкая продукция Maximum transparency and mineralization; moderate colour and dissolved organic matter content; consistently low productivity	Лещево- уклейный Bream-bleak

Примечание. По: ¹[Лозовик и др., 1991; Степанова и др., 2010], ²[Степанова и др., 2021б].

Note. Sources: ¹[Lozovik et al., 1991; Stepanova et al., 2010], ²[Stepanova et al., 2021b].

Апробация ихтиологических типов (плотвично-окуневого, лещево-уклейного, карасевого, окуневого) показала их информативность. Ихтиологическая классификация дополняет традиционные лимнологические подходы. Так, она позволяет выявлять отсутствующие в других шкалах градации (например, дистрофное состояние). Ихтиологическая классификация характеризует не только ихтиоценоз, но и связанные с ним сообщества, а также отражает долгосрочный (ретроспективный) статус водной среды, в отличие от быстро реагирующих планктонных сообществ.

Показано, что вклад рыб-индикаторов в расчет индекса сапробности по Пантле и Букку для

малых озер с низким видовым разнообразием статистически незначим из-за малого числа видов-индикаторов. Однако их учет важен для предотвращения занижения общей сапробности для крупных озер и водоемов в переходных состояниях.

Важным методическим результатом стала успешная реализация принципов гражданской науки. Привлечение опросных и фотографических материалов волонтеров, собранных за 2004–2026 гг., существенно расширило временные рамки наблюдений. Данный подход может применяться при исследовании других малоизученных водных объектов.

Авторы благодарят за помощь в проведении данного исследования руководителя практики на УНС «Валаам» Е. Ю. Воякину; рыболовов-любителей Н. Аниканова, И. Гаснера, А. Зуева, Ф. Зуева, Ю. Зуева, В. Осокина, Д. Семенова, А. Тюльпанова, А. Яковлева, Е. Яценко, И. Крутенко; братию Спасо-Преображенского Валаамского монастыря и лично монаха Иринарха, приславших фотографии и информацию о дате и месте вылова рыб; заведующего лабораторией рыбохозяйственных исследований РГГМУ Н. В. Попова за предоставление доступа к лаборатории и оборудованию; за геоинформационную поддержку благодарим А. В. Бабина.

Литература

- Борисов П. Г., Овсянников Н. С. Определитель промысловых рыб СССР. М.: Пищпромиздат, 1954. 179 с.
- Воякина Е. Ю. Исследование природных комплексов на острове Валаам // Экогидромет – новые горизонты: Мат-лы IV Междунар. молодежной науч.-практ. конференции (Санкт-Петербург, 13–14 марта 2025 г.). СПб., 2025. С. 5–7.
- Воякина Е. Ю. Особенности продукционных процессов в озерах Валаамского архипелага // Труды Зоологического института РАН. 2017. Т. 321, № 1. С. 10–18. doi: 10.31610/trudyzin/2017.321.1.10
- Воякина Е. Ю. Сукцессия фитопланктона озер Валаамского архипелага // Вопросы современной альгологии. 2021. № 2(26). С. 24–28. doi: 10.33624/2311-0147-2021-2(26)-24-28
- Воякина Е. Ю. Фитопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2007. 23 с.
- Гальцова В. В., Дмитриев В. В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных экосистем. СПб.: Наука, 2007. 364 с.
- Зуева Н. В. Водная флора малых лесных озер Валаамского архипелага // Гидробиотика 2010: Мат-лы I (VII) Междунар. конференции по водным макрофитам (Борок, 9–13 октября 2010 г.). Борок, 2010. С. 130.
- Иванов П. В. Классификация озер мира по величине и по их средней глубине // Бюллетень ЛГУ. 1948. № 20. С. 29–36.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 395 с.
- Кокин К. А. Экология высших водных растений. М.: Изд-во МГУ, 1982. 158 с.
- Куликова Е. Ф., Куликова Т. П., Соколова В. А. Фауна озер о. Валаам // Природные комплексы Валаама и воздействие на них рекреации / Науч. ред. А. А. Кучко, И. П. Лазарева. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1983. С. 156–174.
- Лесненко В. К., Абросов В. Н. Озера Псковской области. Псков: ЛГПИ им. А. И. Герцена, 1973. 153 с.
- Лозовик П. А., Сабылина А. В., Коваленко В. Н., Басов М. И., Харкевич Н. С. Гидрохимическая характеристика малых озер Карелии // Антропогенные изменения экосистем малых озер: Мат-лы Всесоюз. совещания, 27–29 марта 1990 г. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 34–37.
- Лукин А. А., Первозванский В. Я., Шарова Ю. Н., Георгиев А. П. Ихтиофауна // Озера Карелии: справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 56–66.
- Макрушин А. В. Библиографический указатель по теме «Биологический анализ качества вод» с приложением списка организмов-индикаторов загрязнения / АН СССР; Зоол. ин-т; Всесоюз. гидробиол. о-во. Л., 1974. 53 с.
- Рыжков Л. П., Артемьева Н. В., Горохов А. В., Марченко Л. П., Раднаева В. А., Рябинкина М. Г. Электронный справочник по озерам бассейна Северной Ладоги // Электронная библиотека Республики Карелия. 2012. 69 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.petsu.ru/book.shtml?levelID=003&id=16122&cType=1> (дата обращения: 15.02.2026).
- Степанова А. Б., Бабин А. В., Зуева Н. В., Зуев Ю. А., Воякина Е. Ю., Семадени И. В. Анализ антропогенного воздействия на водную систему Валаамского архипелага // Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже XX и XXI веков. Черты уникальности и современное состояние: атлас. СПб.: РГГМУ, 2016. С. 31–41.
- Степанова А. Б., Воякина Е. Ю., Зуева Н. В., Куличенко А. Ю., Бабин А. В. Малые изолированные лесные озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцев. М.: РАН, 2021а. С. 477–484.
- Степанова А. Б., Воякина Е. Ю., Зуева Н. В., Куличенко А. Ю., Чернышев А. Н. Внутренние озера, связанные с Ладогой // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцев. М.: РАН, 2021б. С. 471–477.
- Степанова А. Б. Зоопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 1998. 20 с.
- Степанова А. Б., Шарафутдинова Г. Ф., Воякина Е. Ю. Гидрохимические особенности малых озер о. Валаам // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 12. С. 97–109.
- Филатов Н. Н., Литвиненко А. В., Потахин М. С. Гидрографические особенности водоемов // Озера Карелии: справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 15–21.
- Чернышев А. Н., Сергеева В. О., Котова А. К., Никитина С. Н., Бабин А. В., Воякина Е. Ю., Степанова А. Б. Особенности лимнологических параметров системы «Лещевое озеро – Лещевый залив» в период максимального прогрева воды (Валаамский

архипелаг, Ладожское озеро) // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 460–479. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-460-479

Чугунова Н. И. Руководство по изучению возраста и роста рыб: метод. пособие по ихтиологии. М.: АН СССР, 1959. 164 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

Buenano B. B., Zueva N. V. Macrophytes as indicators of the ecological status of Valaam island small lakes system // *Geography, Environment, Sustainability*. 2023. No. 1(16). P. 103–110. doi: 10.24057/2071-9388-2022-056

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4(1). Art. 4. URL: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm (дата обращения: 17.12.2025).

References

Borisov P. G., Ovsyannikov N. S. A key to commercial fishes of the USSR. Moscow: Pishchpromizdat; 1954. 179 p. (In Russ.)

Buenano B. B., Zueva N. V. Macrophytes as indicators of the ecological status of Valaam island small lakes system. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023; 1(16):103–110. doi: 10.24057/2071-9388-2022-056

Chernyshev A. N., Sergeeva V. O., Kotova A. K., Nikitina S. N., Babin A. V., Voyakina E. Yu., Stepanova A. B. Features of the limnological parameters of the Lake Leshchevoe – Leshchevy Bay system during maximum water heating period (Valaam Archipelago, Lake Ladoga). *Gidrometeorologiya i ehkologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2020;61:460–479. (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-460-479

Chugunova N. I. A guide for studying fish age and growth (methodological manual on ichthyology). Moscow: AN SSSR; 1959. 164 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Litvinenko A. V., Potakhin M. S. Hydrographic features of water bodies. *Ozera Karelii: spravochnik = Lakes of Karelia: a reference book*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. P. 15–22. (In Russ.)

Gal'tsova V. V., Dmitriev V. V. Practical course on aquatic ecology and monitoring of aquatic ecosystems. St. Petersburg: Nauka; 2007. 364 p. (In Russ.)

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):4. URL: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm (accessed: 17.12.2025).

Ivanov P. V. Classification of world lakes by size and average depth. *Byulleten' LGU = Bulletin of Leningrad State University*. 1948;20:29–36. (In Russ.)

Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 395 p. (In Russ.)

Kokin K. A. Ecology of higher aquatic plants. Moscow: MGU; 1982. 158 p. (In Russ.)

Kulikova E. F., Kulikova T. P., Sokolova V. A. Fauna of lakes on Valaam Island. *Prirodnye komplekсы Valaama*

i vozdeistvie na nikh rekreatsii = Natural complexes of Valaam and the impact of recreation. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1983. P. 156–174. (In Russ.)

Lesnenko V. K., Abrosov V. N. Lakes of the Pskov Region. Pskov: LGPI im. A. I. Gertsena; 1973. 153 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Sabylina A. V., Kovalenko V. N., Basov M. I., Kharkevich N. S. Hydrochemical characteristics of small lakes in Karelia. *Antropogennnye izmeneniya ehkosistem malykh ozer: materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya (Leningrad, 27–29 marta 1990 g.) = Anthropogenic changes in small lake ecosystems: Proceed. of the All-Union meeting (Leningrad, March 27–29, 1990)*. Leningrad; 1991. P. 34–37. (In Russ.)

Lukin A. A., Pervozvanskii V. Ya., Sharova Yu. N., Georgiev A. P. Ichthyofauna. *Ozera Karelii: spravochnik = Lakes of Karelia: a reference book*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. P. 56–66. (In Russ.)

Makrushin A. V. Bibliographic index on the topic 'Biological analysis of water quality' with an appended list of organisms as pollution indicators. Leningrad; 1974. 53 p. (In Russ.)

Ryzhkov L. P., Artem'eva N. V., Gorokhov A. V., Marchenko L. P., Radnaeva V. A., Ryabinkina M. G. Electronic handbook of lakes in the Northern Ladoga basin. *Ehlektronnaya biblioteka Respubliki Kareliya = Digital library of the Republic of Karelia*. 2012. 69 p. (In Russ.). URL: <https://elibrary.petsru.ru/book.shtml?levelID=003&id=16122&cType=1> (accessed: 15.02.2026)

Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. Quantitative hydroecology: methods of system identification. Tolyatti: IEHVB RAN; 2003. 463 p. (In Russ.)

Stepanova A. B. Zooplankton of inland water bodies of the Valaam Archipelago and the adjacent area of Lake Ladoga: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. St. Petersburg; 1998. 20 p. (In Russ.)

Stepanova A. B., Babin A. V., Zueva N. V., Zuev Yu. A., Voyakina E. Yu., Semadeni I. V. Analysis of anthropogenic impact on the water system of the Valaam Archipelago. *Ehkosistemy Valaamskogo arhipelaga (Ladozhskoe ozero) na rubezhe XX i XXI vekov. Cherty unikal'nosti i sovremennoe sostoyanie: atlas = Ecosystems of the Valaam Archipelago (Lake Ladoga) at the turn of the XX and XXI centuries. Uniqueness and current state: atlas*. St. Petersburg: RGGMU; 2016. P. 31–41. (In Russ.)

Stepanova A. B., Sharafutdinova G. F., Voyakina E. Yu. Hydrochemical features of small lakes of the Island of Valaam. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceed. of the Russian State Hydrometeorological University*. 2010;12:97–109. (In Russ.)

Stepanova A. B., Voyakina E. Yu., Zueva N. V., Kulichenko A. Yu., Babin A. V. Small isolated forest lakes. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ehkosistem Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current status and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem under changing climate conditions*. St. Petersburg: RAS; 2021. P. 477–484. (In Russ.)

Stepanova A. B., Voyakina E. Yu., Zueva N. V., Kulichenko A. Yu., Chernyshev A. N. Inland lakes connected with Lake Ladoga. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ehkosistem*

Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current status and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem under changing climate conditions. St. Petersburg: RAS; 2021. P. 471–477. (In Russ.)

Voyakina E. Yu. Features of production processes in the lakes of the Valaam Archipelago. *Trudy Zoologicheskogo instituta RAN = Proceed. of the Zoological Institute RAS.* 2017;321(1):10–18. (In Russ.). doi: 10.31610/trudyzin/2017.321.1.10

Voyakina E. Yu. Phytoplankton succession in the lakes of the Valaam Archipelago. *Voprosy sovremennoi al'gologii = Issues of Modern Algology.* 2021;2(26): 24–28. (In Russ.). doi: 10.33624/2311-0147-2021-2(26)-24-28

Voyakina E. Yu. Phytoplankton of inland waters of the Valaam Archipelago and the adjacent area of Lake

Ladoga: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. St. Petersburg; 2007. 23 p. (In Russ.)

Voyakina E. Yu. Research of natural complexes on Valaam Island. *Ehkogidromet – novye gorizonty: Materialy IV Mezhdunar. molodezhnoi nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 13–14 marta 2025 g.) = Ekogidromet – new horizons: Proceed. of the IV Int. youth scientific and practical conf. (St. Petersburg, March 13–14, 2025).* St. Petersburg; 2025. P. 5–7. (In Russ.)

Zueva N. V. Aquatic flora of small forest lakes of the Valaam Archipelago. *Gidrobotanika 2010: Materialy I (VII) Mezhdunarodnoi konf. po vodnym makrofitam (Borok, 09–13 okt. 2010 g.) = Hydrobotany 2010: Proceed. of the I (VII) Int. conf. on aquatic macrophytes (Borok, Oct. 9–13, 2010).* Borok; 2010. P. 130. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 25.05.2026; принята к публикации / accepted: 21.07.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Поддубский Георгий Тимурович

магистрант кафедры прикладной
и системной экологии

e-mail: 79046187649@yandex.ru

Гнездова Нина Александровна

магистрант кафедры прикладной
и системной экологии

e-mail: ninagnezdova@gmail.com

Гончарж Михаил Андреевич

магистрант кафедры прикладной
и системной экологии

e-mail: yarida33@gmail.com

Зуева Надежда Викторовна

канд. геогр. наук, доцент кафедры прикладной
и системной экологии

e-mail: nady.zuyeva@ya.ru

CONTRIBUTORS:

Poddubskiy, George

Master's Student

Gnezdova, Nina

Master's Student

Goncharzh, Michael

Master's Student

Zueva, Nadezhda

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor

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 завершенных 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 учетом 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 ее 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.

Объем 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. Объем рисунков не должен превышать 1/4 объема статьи. Рукописи большего объема (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 вкладышах (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 желательно 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 желательно 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 желательно указать ее. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Для каждого источника обязательно указание DOI при 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 °C) 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 Dulldurga:

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:

Гребенщиков 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:

Grebenshchikov 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. 9, 2026

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

S. R. Bogdanov. EQUILIBRIUM DENSITY PROFILES AND THERMOCLINE DEPTH IN LAKES DURING THE PERIOD OF SUMMER STRATIFICATION	5
R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova. SEASONAL AND SPATIAL VARIABILITY OF TEMPERATURE AND TURBIDITY IN A DEEP DYMICTIC LAKE	18
T. V. Efremova, T. G. Kravchenkova, N. I. Palshin. FEATURES OF THE THERMAL AND ICE REGIME OF LAKE ONEGO BAYS BASED ON LONG-TERM OBSERVATIONS	29

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

K. V. Titova, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva. THE PROCESS OF SULFATE REDUCTION IN SEDIMENTS OF HYDROGRAPHICALLY CONNECTED BOREAL LAKES VERKHNEYE AND NIZHNEYE, ARKHANGELSK REGION	41
A. N. Korolev, S. B. Lovinetskaya. HYDROCHEMICAL FEATURES OF LAKES IN THE IRTYSH RIVER CATCHMENT WITHIN THE POLTAVA DISTRICT, OMSK REGION, IN THE SUMMER	58
E. Yu. Yakovlev, A. V. Puchkov, A. E. Lipkina. ASSESSMENT OF THE CURRENT RADIOECOLOGICAL STATE OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE NORTHEASTERN PART OF THE BARENTS SEA	72

HYDROBIOLOGY

V. V. Vezhnavets, M. D. Zhurauliou, D. B. Vlasova, N. Yu. Sukhovilo, B. O. Tsydenov. COMPARISON OF THE STRUCTURAL ORGANIZATION OF ZOOPLANKTON IN LAKE DOLGOE (BELARUS) DURING SUMMER STRATIFICATION AND SPRING HOMOTHERMY	87
I. S. Trifonova, D. P. Struchkina. PHYTOPLANKTON COMPOSITION, BIOMASS AND VERTICAL DISTRIBUTION IN THE MEROMICTIC LAKE UZKOYE (KARELIAN ISTHMUS) ACROSS SEASONS . . .	103
N. M. Kalinkina, T. V. Efremova, Yu. L. Slastina, T. G. Kravchenkova, R. E. Zdorovenov, T. A. Efremova, G. E. Zdorovenova. CYANOBACTERIA BLOOMING IN LAKES OF THE REPUBLIC OF KARELIA UNDER CLIMATE CHANGE AND HUMAN IMPACT	111
N. A. Berezina, P. M. Terentjev, E. M. Zubova. TROPHIC RELATIONSHIPS OF COREGONID AND PERCID FISHES IN NORTHERN LAKES	126
S. F. Komulaynen. STRUCTURE AND INDICATOR CAPABILITIES OF PHYTOPERIPHYTON IN LAKE IMANDRA, MURMANSK REGION	139

N. V. Usov. CURRENT STATE OF MESOZOOPLANKTON IN BLAGOPOLUCHIYA BAY, SOLOVETSKY ARCHIPELAGO	149
G. T. Poddubskiy, N. A. Gnezdova, M. A. Goncharzh, N. V. Zueva. SUPPLEMENTING THE LIMNOLOGICAL CLASSIFICATION OF VALAAM ISLAND LAKES WITH FISH FAUNA DATA	163
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	178

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 9, 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 24.09.2026. Дата выхода 30.09.2026. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 22,0. Усл. печ. л. 21,6.
Тираж 100 экз. Заказ 917. 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. Александра Невского, 50