

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 2, 2025

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2025

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

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; И. В. ДРОБЫШЕВ, доктор биологии (Швеция – Канада); Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; Х. ЙООСТЕН, доктор биологии, проф. (Германия); А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Н. В. ЛУКИНА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, академик РАН, д. б. н., проф.; О. ОВАСКАЙНЕН, доктор математики, проф. (Финляндия); О. Н. ПУГАЧЕВ, академик РАН, д. б. н.; С. А. СУББОТИН, доктор биологии (США); Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Т. Э. ХАНГ, доктор географии (Эстония); П. ХЁЛЬТЯ, доктор геологии, проф. (Финляндия); К. ШАЕВСКИЙ, доктор математики, проф. (Польша); В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия серии «Лимнология и океанология»

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

Издается с января 2009 г.

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

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

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

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

No. 2, 2025

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY

Petrozavodsk
2025

Editor-in-Chief

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

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); I. V. DROBYSHEV, PhD (Biol.) (Sweden – Canada); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; T. E. HANG, PhD (Geog.) (Estonia); P. HÖLTTÄ, PhD (Geol.), Prof. (Finland); E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; H. JOOSTEN, Dr. (Biol.), Prof. (Germany); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); N. V. LUKINA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; O. OVASKAINEN, PhD (Math.), Prof. (Finland); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SUBBOTIN, PhD (Biol.) (USA); D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); K. SZAJEWSKI, PhD (Math.), Prof. (Poland); 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. IL'MAST, DSc (Biol.); A. V. ISAEV, PhD (Geog.); D. V. IVANOV, DSc (Geog.); S. F. KOMULAINEN, DSc. (Biol.); S. A. KONDRAT'EV, DSc (Phys.-Math.); A. V. KURAEV, PhD (Geog.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.), Prof.; I. Sh. NORMATOV, DSc (Chem.), Prof.; L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.), PhD (Biol.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. I. SIDOROVA, PhD (Biol.); A. V. ZIMIN, DSc (Geog.).

Published since January 2009

8 issues a year

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, 2025
© Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences, 2025

УДК 532.59; 556.556.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ КОРИОЛИСА НА СЕЙШЕВЫЕ КОЛЕБАНИЯ В АЗОВСКОМ МОРЕ

Ю. В. Манилюк*, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН (ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011), **uvmsev@yandex.ru*

На основе математического моделирования исследуются сейшевые колебания на береговых станциях Азовского моря, возникающие в результате воздействия стационарного ветра разных направлений длительностью 12 ч. Выполнены расчеты с учетом и без учета силы Кориолиса. Сравнительный анализ результатов расчетов показал, что в Должанской, а также в расположенных на южном побережье Азовского моря Мысовом и Темрюке учет влияния вращения Земли в большинстве рассмотренных случаев приводит к увеличению максимальных отклонений уровня моря, достигая в Темрюке 50 %. В Приморско-Ахтарске, а также в расположенных на северном побережье Бердянске и Мариуполе, напротив, в большинстве рассмотренных случаев учет силы Кориолиса приводит к ослаблению сейш, максимально в Бердянске – до 44 %. В Таганроге, находящемся на северо-восточной окраине моря в вершине Таганрогского залива, имеют место наибольшие абсолютные значения отклонений уровня моря, но учет силы Кориолиса не вызывает существенных изменений максимальных отклонений уровня – они не превышают 21 %. Вращение Земли приводит в Азовском море к возникновению сдвига фаз между колебаниями уровня, имеющими место в случае, когда сила Кориолиса учитывается, и без ее учета. В зависимости от направления ветра, вызвавшего сейши, данный сдвиг фаз может быть устойчивым либо изменяться с течением времени. Сейшевые колебания, имеющие место при учете силы Кориолиса, в целом более интенсивные на начальной стадии процесса, но быстрее затухают, чем колебания без ее учета. При всех рассмотренных направлениях ветра, как с учетом вращения Земли, так и без учета, генерируется интенсивная мода сейшевых колебаний с периодом, равным 14,4 ч. Вращение Земли увеличивает интенсивность данной моды. Кроме этого, сила Кориолиса приводит к генерации более высокочастотных мод (с периодами 6,5; 6,9 ч) по сравнению со случаями, когда она не учитывается (периоды 7,2; 7,5 ч). При этом высокочастотные колебания, рассчитанные без учета вращения Земли, интенсивнее, чем с учетом. Анализ результатов расчетов показал, что вращение Земли оказывает ощутимое влияние на величины амплитуд, модовый состав, характер движения воды сейшевых колебаний в Азовском море. В данном водоеме необходимо учитывать силу Кориолиса при моделировании сейш.

Ключевые слова: Азовское море; длинные волны; сейши; сила Кориолиса

Для цитирования: Манилюк Ю. В., Фомин В. В. Исследование влияния силы Кориолиса на сейшевые колебания в Азовском море // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 5–18. doi: 10.17076/lim1948

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ (FNNN-2024-0016).

Yu. V. Manilyuk*, V. V. Fomin. A STUDY OF THE CORIOLIS FORCE EFFECT ON SEICHE OSCILLATIONS IN THE SEA OF AZOV

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences (2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia), *uvmsev@yandex.ru

Seiche oscillations at coastal stations of the Sea of Azov caused by the action of stationary winds of different directions lasting 12 hours are investigated based on mathematical modeling. Calculations are made with and without taking into account the Coriolis force. A comparative analysis of the calculation results showed that in Dolzhanskaya, as well as in points located on the southern coast of the Azov Sea: Mysovoy, Temryuk, factoring in the Earth's rotation in most of the cases led to an increase in the maximum level deviations, reaching up to 50 % in Temryuk. In Primorsko-Akhtarsk, as well as in points located on the northern coast: Berdyansk, Mariupol, on the contrary, factoring in account the Coriolis force in most cases led to a weakening of seiches, the most notably in Berdyansk – up to 44 %. In Taganrog, located at the north-eastern end of the sea at the top of the Taganrog Bay, the absolute values of sea level deviations are the largest, but factoring in the Coriolis force does not cause significant changes in the maximum level deviations – they do not exceed 21 %. The Earth's rotation leads to a phase shift in the Sea of Azov between the level oscillations that occur in the case when the Coriolis force is taken into account and in the case it is not. Depending on the direction of the wind that cause the seiches, this phase shift can be stable or change over time. Seiche oscillations that occur when taking into account the Coriolis force are generally more intensive in the initial stage of the process, but they fade away faster than when it is disregarded. For all the wind directions considered, both with and without taking into account the rotation of the Earth, an intensive mode of seiche oscillations with a period of 14.4 hours is generated. The rotation of the Earth augments the intensity of this mode. In addition, the Coriolis force leads to the generation of higher-frequency modes (with periods of 6.5; 6.9 hours) compared to cases when it is not taken into account (periods of 7.2; 7.5 hours). At the same time, high-frequency oscillations calculated without taking the rotation of the Earth into account are more intensive than with it. Analysis of the calculation results showed that the Earth's rotation has a noticeable effect on the amplitude, modal composition, and nature of the water movement of seiche oscillations in the Sea of Azov. Taking the Coriolis force into account when modeling seiches in this sea is essential.

Keywords: Sea of Azov; long waves; seiches; Coriolis force

For citation: Manilyuk Yu. V., Fomin V. V. A study of the Coriolis force effect on seiche oscillations in the Sea of Azov. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 5–18. doi: 10.17076/lim1948

Funding. Financial support for the research was provided from the federal budget for the implementation of state assignment to the Federal Research Center Marine Hydrophysical Institute RAS (MHI RAS) (FNNN-2024-0016).

Введение

Сейшевые колебания являются одним из самых распространенных явлений, наблюдающихся в ограниченных водоемах. Причин, вызывающих сейши, множество. К ним относятся: неравномерное распределение атмосферного давления над акваторией или его периодическое изменение во времени; действие ветра на водную поверхность; резкое повышение или понижение уровня в какой-либо части водоема за счет притока или оттока речных вод, выпадения осадков; сейсмические колебания земной коры [Океанографическая..., 1980]. Важными факторами, определяющими параметры сейш,

являются профиль берегов и батиметрия водоема, наличие островов и полуостровов. Влияние этих факторов на сейши рассмотрено в работе [Kodomari, 1982], а влияние фактора наличия крупных заливов – в работе [Manilyuk, Cherkessov, 1997].

Сила Кориолиса, обусловленная вращением Земли, при определенных условиях может оказывать заметное воздействие на движение воды. Для его оценки обычно используется число Россби: $Ro = U/(Lf)$, где U – характерная скорость геофизического явления (в нашем случае скорость распространения длинных волн, которая вычисляется по формуле: $U = \sqrt{gH}$; здесь g – ускорение свободного

падения, H – средняя глубина бассейна); L – характерный пространственный масштаб геофизического явления (длина бассейна), $f = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, где угловая скорость вращения Земли Ω – географическая широта.

При $Ro < 1$ сила Кориолиса существенно влияет на движение воды [Kodomari, 1982]. Например, в средних широтах $f \sim 10^{-4}$, и если величина U порядка нескольких метров в секунду, то водоему нужна длина более нескольких сотен километров, чтобы удовлетворить $Ro < 1$. Это условие выполняется лишь в некоторых крупнейших водоемах мира, например, в озерах, входящих в систему Великих озер: Верхнее, Эри, Онтарио. А также в Каспийском и Балтийском морях. Ладожское и Онежское – два крупнейших озера в Европе – возможно, слишком малы для таких процессов [Hutter et al., 2011]. В работах [Platzman, Rao, 1964; Rao, Schwab, 1976; Schwab, Rao, 1977; Sebastia et al., 2014] рассматривалось влияние силы Кориолиса в Великих озерах и сделан вывод, что вращение Земли обычно вызывало небольшое увеличение периода сейш для низшей моды, а приращение периода было менее 1 %. Поэтому делается допущение, что влияние силы Кориолиса на период сейш в природных озерах пренебрежимо мало. В работе [Rao, 1966] на основе численной модели исследуются собственные колебания однородной жидкости в прямоугольных бассейнах постоянной глубины с учетом вращения. В ней показано, что вращение приводит к изменению значений собственных периодов и образованию амфидромических систем.

Азовское море относится к типу внутренних морей. Его протяженность в зональном направлении (без учета Таганрогского залива) составляет около 230 км, средняя глубина моря ~ 7 м, средняя широта $\varphi = 46^\circ$. При этих значениях параметров $Ro = 0,34$. Поэтому следует ожидать, что сила Кориолиса может оказывать влияние на сейшевые колебания. Вопрос о влиянии вращения Земли на сейшевые колебания в Азовском море является практически неисследованным. Лишь в работах [Матишов, Инжебейкин, 2009; Филиппов, 2012] некоторое внимание уделено этому вопросу.

В силу мелководности Азовского моря (его максимальная глубина составляет 13,5 м) ветер является основным фактором, определяющим генерацию сейш, охватывающих весь водоем.

Целью настоящей работы является изучение на основе математического моделирования влияния силы Кориолиса на параметры сейшевых колебаний в Азовском море,

возбуждаемых в результате действия ветров различных направлений.

Материалы и методы

Сведения о сейшах Азовского моря и обзор литературы

Одной из характерных особенностей Азовского моря является наличие сейш большой амплитуды, возникающих после прекращения действия возмущений, вызывающих сгонно-нагонные колебания уровня моря. Амплитуды сейшевых колебаний могут достигать 40–60 % от экстремальных значений нагона или сгона [Гидрометеорология..., 1991]. По данным наблюдений [Волкова, Овсянников, 1978; Доценко, Иванов, 2013], размахи сейшевых колебаний уровня моря могут достигать в Ейске, Геническом, Приморско-Ахтарске 50 см, в Таганроге – 70 см.

Время затухания сейшевых колебаний изменяется в широких пределах (от 2 до 8 суток [Гидрометеорология..., 1991]) и существенно зависит от характера возмущений. В силу этого наводнение, вызванное подъемом уровня моря, или понижение уровня в портах и судоходных каналах, являющееся результатом сгона, может повториться неоднократно после прекращения действия возмущающих сил. Таким образом, нахождение периодов и пространственной структуры сейш Азовского моря, а также условий, при которых генерируется та или иная мода сейш, является весьма важным.

Начало исследованиям сейшевых колебаний в Азовском море положила работа [Курчатов, 1925], в которой И. В. Курчатов вычислил период одноузловой сейши Азовского моря, равный 23 ч. Также в этой работе проведен анализ записей с мареографов, расположенных в Ейске и Темрюке, за июнь–август 1924 г. В результате выделен период колебаний, равный 24,5 ч. Интенсивные сейши с этим периодом имеют место и в Темрюке и Ейске. При этом фазы колебаний сдвинуты на 180° друг относительно друга. Амплитуда колебаний уровня моря была больше в Ейске, чем в Темрюке, и достигала 80 см. В среднем амплитуды сейш в Ейске составляют 30–40 см, в Темрюке – около 25 см. Кроме того, в указанной работе на основе анализа мареограмм делается вывод о наличии в Темрюке сейш с периодом 6–7 ч, характерных для юго-западной части моря.

В публикации [Герман, 1970] обработаны и проанализированы данные наблюдений за 1967–1968 годы для пунктов Геническ, Бердянск, Мариуполь, Кривая коса, Перебойный,

Ейск, Должанская, Ясенская переправа, Приморско-Ахтарск, Темрюк и Мысовое с интервалом дискретности 3 или 6 часов в зависимости от пункта. Анализ функций спектральной плотности показал, что наряду с двухсуточной волной в Азовском море существует сложная система волн с периодами 24, 15 и 12,5 ч. Колебания с периодом 24 ч прослеживаются во всех рассмотренных пунктах побережья, за исключением Должанской. Составляющие с периодами около 15 и 12,5 ч проявляются в виде небольших пиков функций спектральной плотности колебаний уровня для пунктов Геничesk, Приморско-Ахтарск, Темрюк и Мысовое.

В работе [Волкова, Овсянников, 1978] на основе анализа рядов ежедневных четырехсуточных наблюдений на станциях Темрюк, Приморско-Ахтарск, Ейск, Бердянск и Геничesk получены значения амплитуд сейш и периоды младших мод. При этом колебания уровня моря для каждой рассмотренной станции показали четко выраженную 24-часовую периодичность. Установлено, что суточные колебания наиболее ярко проявляются летом и практически отсутствуют зимой. Это свидетельствует об их связи с бризовыми ветрами. Суточные колебания уровня моря наиболее интенсивны в Ейске, Геничesке, Приморско-Ахтарске, где их размахи лежат в пределах 50 см, и в Таганроге – до 70 см. Наименьшие размахи колебаний имеют место в Бердянске и Темрюке (20–30 см). Кроме пика на 24 ч на графиках спектральной плотности, приведенных в этой работе, выделяются также пики на периодах 15–16 ч и около 8 ч.

Имеется ряд работ, посвященных исследованию сейш Азовского моря на основе математического моделирования. В [Иванов и др., 1994] с помощью конечно-элементной численной модели [Манилюк, Черкесов, 1994] решается задача о собственных колебаниях бассейна Азовского моря без учета вращения Земли. В ней получены следующие собственные периоды: 27,9; 16,3; 12,5; 10,9; 8,7; 8,2; 7,4; 6,5; 6,1; 5,9; 5,5 ч, а также соответствующие им собственные функции, определяющие пространственную структуру колебаний уровня моря. В [Манилюк, Черкесов, 2016] на основе аналитического решения без учета вращения Земли получены собственные периоды для ограниченного бассейна, представляющего приближенную модель Азовского моря: 25,3; 14,0; 12,6; 12,3; 9,4; 7,0; 6,8; 6,3 ч.

Разнообразные численные модели, в которых сейши Азовского моря представляются в виде колебаний воды, происходящих после

прекращения действия того или иного вида атмосферных возмущений, позволяют получить решения задачи с учетом влияния силы Кориолиса. Так, в [Еремеев и др., 2000] с помощью модели, разработанной в отделе теории волн Морского гидрофизического института, учитывающей вращение Земли, исследовано влияние направления и скорости перемещения над Азовским морем типичных мелкомасштабных циклонов на генерацию в нем сейш. Установлено, что в результате прохождения над морем мелкомасштабных типичных циклонов возбуждаются сейшевые колебания следующих периодов: 27,0; 16,3; 14,5; 11,0; 8,5; 7,2 ч и выделены условия возникновения указанных мод. В работах, выполненных в Южном научном центре РАН [Матишов и др., 2008; Матишов, Инжебейкин, 2009; Инжебейкин и др., 2011], на основе современных данных о морфометрических характеристиках моря с помощью двумерной численной гидродинамической модели, базирующейся на теории мелкой воды, учитывающей вращение Земли, исследованы собственные колебания уровня Азовского моря. Получены частотные и пространственные характеристики первых пяти мод осцилляций уровня Азовского моря, соответствующие сейшевым колебаниям с периодами 38,4; 23,7; 12,1; 8,8; 5,1 ч. В работе, выполненной в Государственном океанографическом институте им. Н. Н. Зубова [Филиппов, 2012], проведено гидродинамическое моделирование длинноволновых колебаний на основе решения системы уравнений мелкой воды с учетом влияния силы Кориолиса. В качестве возмущения использовались поля постоянного ветра северного или восточного направлений. Получены оценки периодов сейшевых колебаний, остающихся после прекращения действия ветра, проанализирована их пространственная структура. Выделены следующие периоды сейшевых колебаний: 23,0; 15,0; 8,2; 7,5; 6,0 ч.

Также на основе модели длинных волн в работе [Сабурин, Елизарова, 2017] приведены результаты расчетов для западного и южного ветров со скоростью 15 м/с и продолжительностью 10 ч. Исследовано влияние силы трения о дно на параметры сейш. Показано, что она практически не влияет на величины периодов колебаний, но приводит к значительному (в 5–6 раз) уменьшению времени их затухания. После воздействия западного ветра выделены сейши с периодом 15,5–15,8 ч, которые наиболее заметны в Бердянске, Таганроге, Геничesке. После прекращения воздействия южного ветра возникает сейша с периодом 6,2–6,5 ч, с наибольшей интенсивностью проявляющаяся

в Темрюке и Бердянске. В Таганроге имеет место более сложная картина осцилляций, обусловленная сложением колебаний разных частот. Также в этой работе отмечается, что происходит вращение сейш против часовой стрелки, при этом полный оборот совершается за 24–25 ч.

В статье [Демышев и др., 2017] с использованием модели POM изучалось влияние продолжительного восточного ветра на колебания уровня и течения, возникающие после прекращения действия возмущающих сил. На прибрежных станциях выделены периоды 15–16 ч, а в центральной части моря – 13–16,5 ч. В работе [Корженовская и др., 2022] приводятся результаты исследований спектра длинноволновых колебаний уровня Азовского моря на основе данных натурных наблюдений. Выделены следующие периоды собственных колебаний, наблюдаемые практически на всех прибрежных станциях: 22,5; 14,1; 6,7; 3,2 ч. Результаты численного моделирования, основанного на решении задачи на собственные значения, дали следующие периоды собственных колебаний бассейна: 23,5; 13,9; 11,2; 9,6; 8,7; 7,5; 6,6; 5,8 ч. Численное моделирование на основе POM для эксперимента с заданием полей ветра и давления из реанализа и эксперимента с использованием модельного ветра дало несколько различающиеся на низких частотах периоды: 24,2; 14,7; 9,9; 3,4 ч в первом случае и 25,3; 14,6; 10,8; 7,6; 5,0 и 3,7 ч во втором случае. Имеющиеся незначительные различия в периодах с результатами решения задачи на собственные значения, по мнению авторов работы [Корженовская и др., 2022], могут быть объяснены учетом вращения Земли в POM.

Таким образом, имеется значительное количество публикаций, посвященных исследованию сейш в Азовском море, но до настоящего времени влияние силы Кориолиса на них остается практически неизученным. Ниже с использованием математического моделирования делается попытка внести ясность в этот вопрос.

Математическая модель и численные эксперименты

Исследование сейшевых колебаний в Азовском море проводилось с помощью модели ADvanced CIRCulation (ADCIRC) [Luettich et al., 1992; Luettich, Westerink, 2004]. Это конечно-элементная нелинейная модель мелкой воды, широко используемая для исследования гидродинамических процессов в океанах, морях,

заливах и эстуариях. Одно из основных ее применений – моделирование полей уровня воды и течений в прибрежной зоне, вызванных приливами и различными метеорологическими воздействиями [Westerink et al., 2008; Sebastia et al., 2014; Garzon, Ferreira, 2016; Colvin et al., 2018; Pavlova et al., 2020; Shashank et al., 2021]. Модель применялась и к Азовскому морю для расчета штормовых нагонов и наводнений в дельте реки Дон [Fomin et al., 2018] и дельте реки Кубань [Фомин и др., 2018]. Также имеется серия статей [Манилюк, Черкесов, 2016; Манилюк и др., 2020а, б, 2021, 2023], в которых с помощью ADCIRC изучаются сейшевые колебания в системах связанных бухт.

В настоящем исследовании использовалась конфигурация ADCIRC из работы [Фомин, Полозок, 2013]. Неструктурированная расчетная сетка, состоящая из 10 835 треугольных конечных элементов, покрывала Азовское море, Керченский пролив и часть Черного моря. В качестве атмосферного форсинга использовался ветер на высоте 10 м. Ветровое напряжение рассчитывалось с использованием квадратичного закона сопротивления Гарратта [Garratt, 1977]. Коэффициент аэродинамического сопротивления задавался линейной функцией скорости ветра. Для расчета придонных касательных напряжений использовалась квадратичная зависимость от скорости течений с гибридной аппроксимацией коэффициента трения [Фомин, Полозок, 2013].

В модельных расчетах сток рек не учитывался. Уровень моря на южной открытой границе расчетной области определялся с помощью условия излучения [Luettich, Westerink, 2004]. Горизонтальная вязкость не включалась. Шаг интегрирования по времени составлял 3 с. Расчеты проводились в режиме параллельных вычислений с использованием технологии Message Passing Interface (MPI).

Моделирование сейшевых колебаний в Азовском море проводилось для южного (Ю), юго-восточного (Ю-В), юго-западного (Ю-З), западного (З), восточного (В), северного (С), северо-восточного (С-В) и северо-западного (С-З) ветров со скоростями 15 м/с. Ветер действовал на протяжении 12 ч, после чего расчет выполнялся в режиме свободных колебаний, происходивших на временном интервале длительностью 168 ч (7 суток). Временные ряды колебаний уровня моря анализировались начиная с момента времени $t = 24$ ч для восьми прибрежных станций: Геническ, Бердянск, Мариуполь, Таганрог, Должанская, Приморско-Ахтарск, Темрюк, Мысовое (рис. 1).

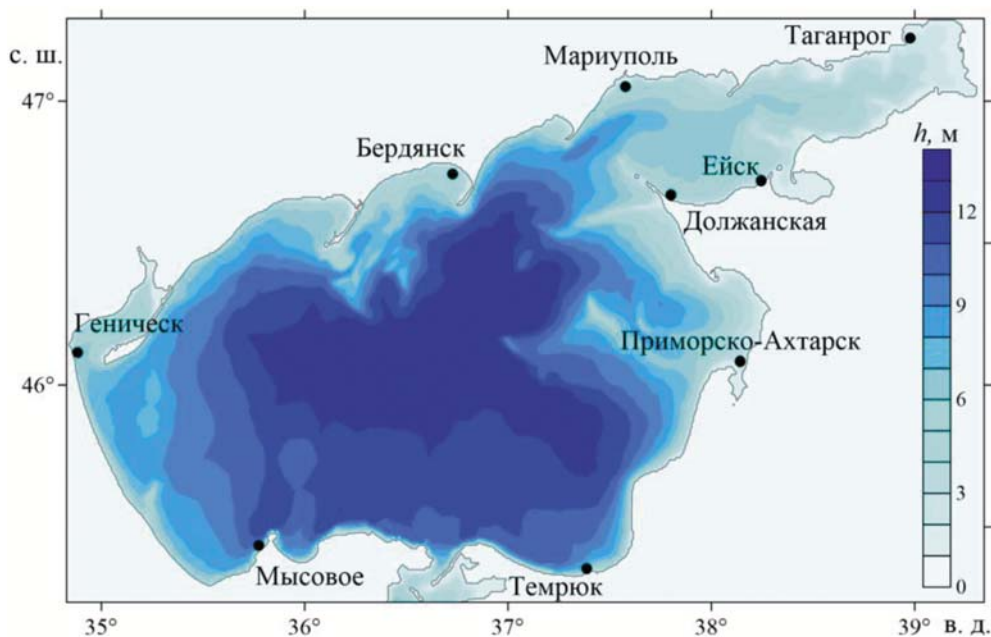


Рис. 1. Азовское море. Расположение береговых станций, в которых анализировались рассчитанные колебания уровня

Fig. 1. Sea of Azov. Location of the coastal stations where the calculated level oscillations were analyzed

Результаты и обсуждение

В таблице приведены рассчитанные максимальные отклонения уровня моря для свободных колебаний, происходящих на протяжении 6 суток начиная от момента времени $t = 12$ ч после прекращения действия ветра. Как видно, наибольшее влияние на амплитуды сейш вращение Земли оказывает в Темрюке, где с учетом вращающейся Земли максимальные отклонения уровня увеличиваются для всех рассмотренных случаев на 23–50 % в зависимости от направления ветра. При воздействии З и В ветров влияние вращающейся Земли в данном пункте наиболее существенное. Аналогичная картина отмечается в Должанской, где во всех рассмотренных случаях учет силы Кориолиса приводит к увеличению максимальных отклонений уровня на 11–42 % в зависимости от направления ветра. Наибольшее влияние вращающейся Земли имеет при воздействии С-З и Ю-В ветров. В Мысовом учет силы Кориолиса также приводит к увеличению максимальных отклонений уровня моря во всех рассмотренных случаях (наибольшее значение составляет 40 % при воздействии С-З и Ю-В ветров), за исключением сейш, вызванных действием З и В ветров, когда данный эффект не проявляется. В Мариуполе, напротив, в большинстве рассмотренных случаев

учет вращающейся Земли приводит к ослаблению сейш (максимально – до 29 %, когда действуют С и Ю ветры), за исключением случаев воздействия З и В ветров, при котором влияние силы Кориолиса отсутствует.

В Геничеське, Бердянске, Таганроге, Приморско-Ахтарске учет силы Кориолиса может приводить как к усилению сейшевых колебаний, так и к их ослаблению, в зависимости от направления вызвавшего их ветра. Из указанных пунктов наиболее выражено влияние вращающейся Земли имеет место в Бердянске, где приводит к увеличению или уменьшению максимальных отклонений уровня моря до 44 % в зависимости от направления ветра.

Наиболее слабо влияние вращающейся Земли на максимальные отклонения уровня выражено в Геничеське (не превышает 13 %), расположенном на северо-западной окраине моря в Утлюкском лимане. В Таганроге, находящемся на северо-восточной окраине моря в вершине Таганрогского залива, учет влияния вращающейся Земли также не приводит к значительным изменениям максимальных отклонений уровня моря – они не превышают 21 %, хотя в данном пункте имеют место их наибольшие абсолютные значения.

Отметим, что при действии ветров с одинаковыми параметрами, но имеющих противоположные направления, получаются равные значения максимальных отклонений уровня моря

Максимальные отклонения уровня моря (см), рассчитанные в режиме свободных колебаний, в зависимости от направлений вызвавших их ветров

Maximum sea level deviations (cm), calculated in the free oscillation mode, depending on the wind directions that caused them

Пункт Coastal point	Направление ветра Wind direction							
	З W	С-З NW	Ю-З SW	С N	Ю S	В E	С-В NE	Ю-В SE
Геническ Genichesk	$\frac{18/17}{-6\%}$	$\frac{13/13}{0\%}$	$\frac{17/15}{-13\%}$	$\frac{8/9}{11\%}$	$\frac{8/9}{11\%}$	$\frac{18/17}{-6\%}$	$\frac{17/15}{-13\%}$	$\frac{13/13}{0\%}$
Бердянск Berdyansk	$\frac{5/9}{44\%}$	$\frac{10/9}{-11\%}$	$\frac{13/9}{-44\%}$	$\frac{18/16}{-13\%}$	$\frac{18/16}{-13\%}$	$\frac{5/9}{44\%}$	$\frac{13/9}{-44\%}$	$\frac{10/9}{-11\%}$
Мариуполь Mariupol	$\frac{7/7}{0\%}$	$\frac{7/6}{-17\%}$	$\frac{10/9}{-10\%}$	$\frac{9/7}{-29\%}$	$\frac{9/7}{-29\%}$	$\frac{7/7}{0\%}$	$\frac{10/9}{-10\%}$	$\frac{7/6}{-17\%}$
Таганрог Taganrog	$\frac{18/25}{18\%}$	$\frac{16/14}{-14\%}$	$\frac{22/28}{21\%}$	$\frac{12/10}{-17\%}$	$\frac{12/10}{-17\%}$	$\frac{18/25}{18\%}$	$\frac{22/28}{21\%}$	$\frac{16/14}{-14\%}$
Должанская Dolzhanskaya	$\frac{7/9}{22\%}$	$\frac{7/12}{42\%}$	$\frac{8/9}{11\%}$	$\frac{6/7}{14\%}$	$\frac{6/7}{14\%}$	$\frac{7/9}{22\%}$	$\frac{8/9}{11\%}$	$\frac{7/12}{42\%}$
Приморско-Ахтарск Primorsko-Akhtarsk	$\frac{11/15}{27\%}$	$\frac{10/10}{0\%}$	$\frac{17/16}{-6\%}$	$\frac{14/9}{-36\%}$	$\frac{14/9}{-36\%}$	$\frac{11/15}{27\%}$	$\frac{17/16}{-6\%}$	$\frac{10/10}{0\%}$
Темрюк Temryuk	$\frac{6/12}{50\%}$	$\frac{11/16}{31\%}$	$\frac{7/10}{30\%}$	$\frac{10/13}{23\%}$	$\frac{10/13}{23\%}$	$\frac{6/12}{50\%}$	$\frac{7/10}{30\%}$	$\frac{11/16}{31\%}$
Мысовое Mysovoe	$\frac{8/8}{0\%}$	$\frac{6/10}{40\%}$	$\frac{9/10}{10\%}$	$\frac{8/10}{20\%}$	$\frac{8/10}{20\%}$	$\frac{8/8}{0\%}$	$\frac{9/10}{10\%}$	$\frac{6/10}{40\%}$

Примечание. В числителе через косую черту приведены соответственно отклонения уровня, рассчитанные без учета и с учетом силы Кориолиса. В знаменателе – относительные увеличения или уменьшения (со знаком минус) максимальных отклонений уровня, вызванные учетом силы Кориолиса.

Note. The numerator shows the level deviations calculated with and without the Coriolis force, respectively, through a slash. The denominator shows the relative increases or decreases (with a minus sign) of the maximum level deviations caused by the Coriolis force.

в режиме свободных колебаний, происходящих после завершения переходных процессов. При анализе из временных рядов колебаний уровня были удалены интервалы длительностью 24 ч от начала прекращения действия ветра и рассматривается только процесс установившихся свободных колебаний. Данный результат можно объяснить тем, что воздействие на акваторию моря ветров с одинаковыми параметрами, но противоположных направлений вызывает схожие отклики колебательной системы, только колебания будут происходить в противофазе. Об этом свидетельствуют результаты анализа мареограмм, проведенного нами вне рамок данной статьи.

Рассмотрим особенности сейшевых колебаний для пунктов, расположенных на побережьях двух видов: проходящих в зональном и меридиональном направлениях. У Азовского моря их протяженность отличается примерно в 2 раза (зональное длиннее, рис. 1). На рис. 2 и 3 для пунктов Бердянск (побережье, проходящее в зональном направлении) и Приморско-Ахтарск (побережье, проходящее в меридиональном направлении) приведены мареограммы для режима свободных колебаний, вызванных

воздействием ветров разных румбов, рассчитанные с учетом и без учета вращения Земли. Отсчет времени начинается через 24 ч после прекращения действия ветра, когда все переходные процессы завершены. Видно, что направление ветра, действующего на акваторию, и учет вращения Земли оказывают существенное воздействие на параметры сейшевых колебаний в Азовском море.

Сейши, порожденные воздействием З и Ю-З ветров с учетом и без учета силы Кориолиса, в Бердянске имеют противофазный характер (рис. 2, а, б). Сейшевые колебания, сгенерированные С ветром, сначала имеют противофазный характер (рис. 2, с), затем перестраиваются на протяжении ~ 1,5 суток и становятся синфазными, после чего через ~ 1,5 суток снова возвращаются к противофазной структуре. Сейши, возбуждаемые С-З ветром, имеют более сложный характер, обусловленный наличием нескольких мод, сопоставимых по интенсивности (рис. 2, д). На начальном этапе колебания уровня моря близки к синфазным, затем с $t \sim 36$ ч они становятся противофазными, а с $t \sim 72$ ч – снова синфазными. При этом заметно, что в случае

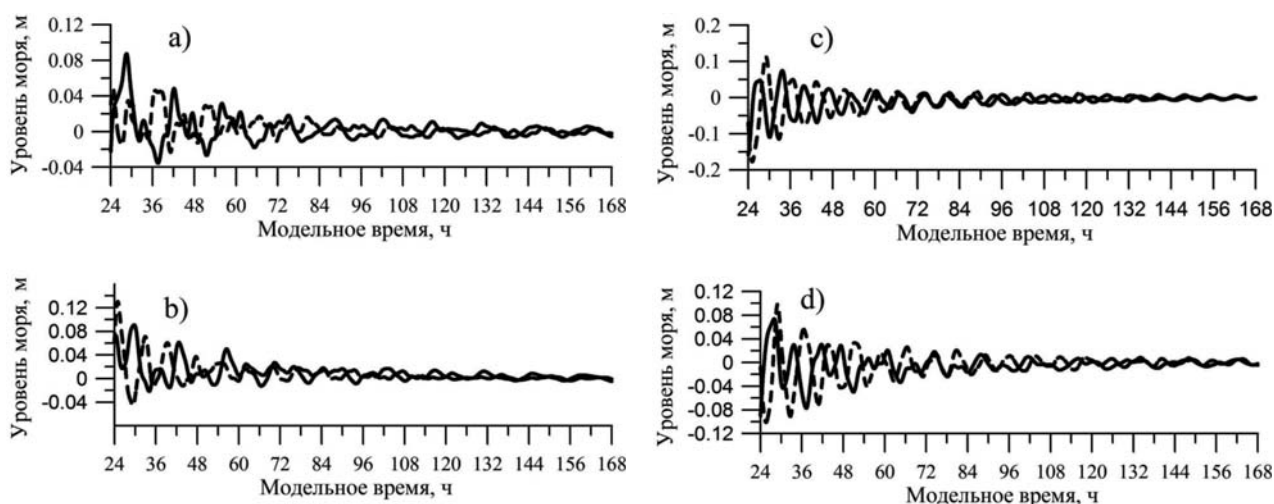


Рис. 2. Мареограммы в пункте Бердянск, рассчитанные с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) вращения Земли, для режима свободных колебаний. Здесь и на рис. 3: а) колебания, происходящие после прекращения действия западного ветра, б) юго-западного, с) северного, d) северо-западного

Fig 2. Mareograms at the point of Berdyansk, calculated taking into account (solid line) and without taking into account (dashed line) the Earth rotation, for the free oscillation mode. Here and in Fig. 3: a) oscillations occurring during the pause of the west wind, b) southwest wind, c) north wind, d) northwest wind

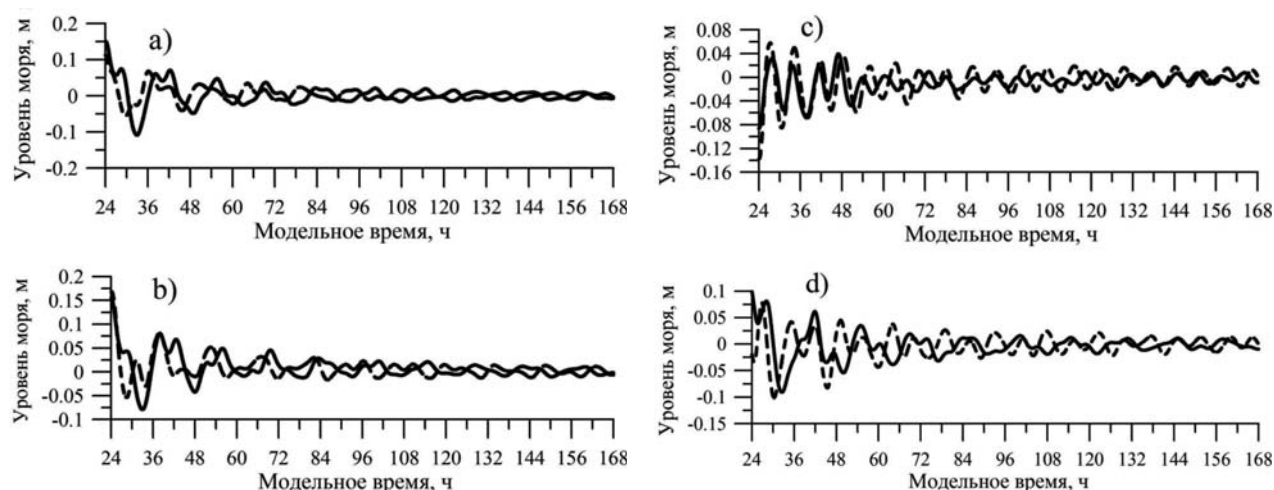


Рис. 3. Мареограммы в пункте Приморско-Ахтарск, рассчитанные с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) вращения Земли, для режима свободных колебаний

Fig 3. Mareograms at the point of Primorsko-Akhtarsk, calculated taking into account (solid line) and without taking into account (dashed line) the Earth rotation, for the free oscillation mode

с учетом вращения Земли преобладает мода с большим периодом.

На восточном побережье моря для сейшевых колебаний прослеживаются закономерности, аналогичные имеющим место на северном побережье. В Приморско-Ахтарске сейши, порожденные воздействием З и Ю-З ветров с учетом и без учета силы Кориолиса, имеют противофазный характер (рис. 3, а, б). У сейшевых колебаний, вызванных С и С-З ветром,

с течением времени изменяется разность фаз (рис. 3, с, d). При этом заметно, что для сейш, сгенерированных С-З ветром, для случая, когда учитывается вращение Земли, преобладает мода, имеющая больший период, чем для случая без учета вращения.

Таким образом, вращение Земли приводит в Азовском море к возникновению сдвига фаз между колебаниями уровня моря, имеющими место в случае, когда сила Кориолиса

учитывается, и случае без ее учета. При воздействии З и Ю-З ветров сдвиг фаз устойчивый и колебания уровня моря происходят в противофазе, а у сейш, порождаемых действием С и С-З ветров, сдвиг фаз значительно меняется с течением времени и колебания могут происходить как синфазно, так и противофазно.

Отметим также, что сейшевые колебания, имеющие место при учете силы Кориолиса, в целом более интенсивные на начальной стадии процесса, но затухают быстрее, чем колебания без ее учета.

Рассмотрим, как учет силы Кориолиса влияет на спектральный состав и интенсивность сейшевых колебаний, возбуждаемых действием ветра. На рис. 4 и 5 для Бердянска и Приморско-Ахтарска приведены периодограммы для сейшевых колебаний, вызванных ветрами различных направлений. Как показывает анализ этих рисунков, и для Бердянска, и для Приморско-Ахтарска независимо от учета влияния вращения Земли выделяется интенсивный пик

на периоде 14,4 ч. Вращение Земли увеличивает интенсивность данной моды сейш. Этот период (или близкий к нему период, равный 15 ч) установлен многими исследователями на основе как обработки данных натурных наблюдений, так и математического моделирования, включая решения задач на собственные значения и с начальным возмущением (см. выше подраздел «Сведения о сейшах Азовского моря и обзор литературы»). Анализ результатов расчетов показал, что колебание с периодом 14,4 ч проявляется с высокой интенсивностью во всех рассмотренных в данной работе пунктах (рис. 1), как при учете силы Кориолиса, так и без ее учета.

В Бердянке кроме периода 14,4 ч выделяется период 7,5–7,6 ч, полученный при расчетах, когда сила Кориолиса не учитывается, и период, равный 6,9 ч – когда учитывается (рис. 4). При этом мода с периодом 7,5–7,6 ч интенсивнее, чем мода с периодом 6,9 ч. В Приморско-Ахтарске наблюдается аналогичная картина (рис. 5):

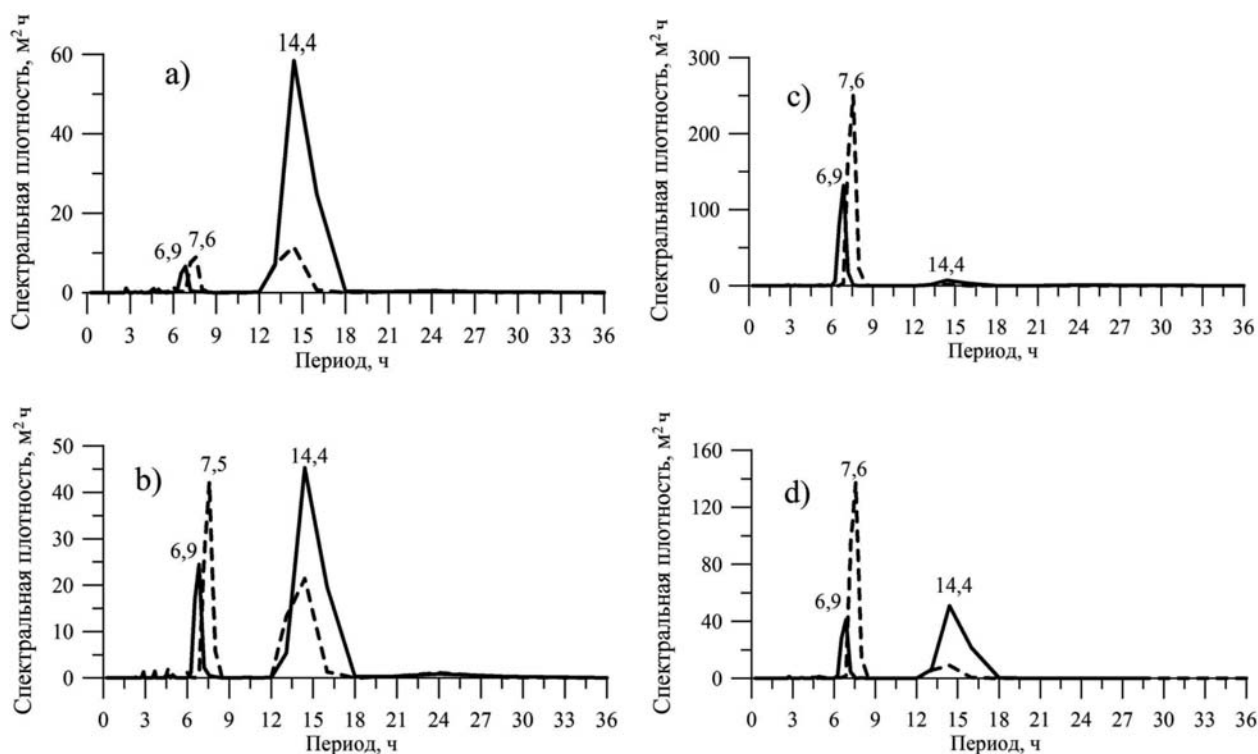


Рис. 4. Периодограммы сейшевых колебаний, вызванных воздействием ветров разных направлений, на северном побережье Азовского моря в пункте Бердянск, рассчитанные с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) вращения Земли. Здесь и на рис. 5: а) после прекращения действия западного ветра, б) юго-западного, с) северного, д) северо-западного

Fig 4. Periodograms of seiche oscillations caused by the impact of winds of different directions on the northern coast of the Sea of Azov at the point of Berdyansk, calculated taking into account (solid line) and without taking into account (dashed line) the Earth rotation. Here and in Fig. 5: a) during the pause of the west wind, b) southwest wind, c) north wind, d) northwest wind

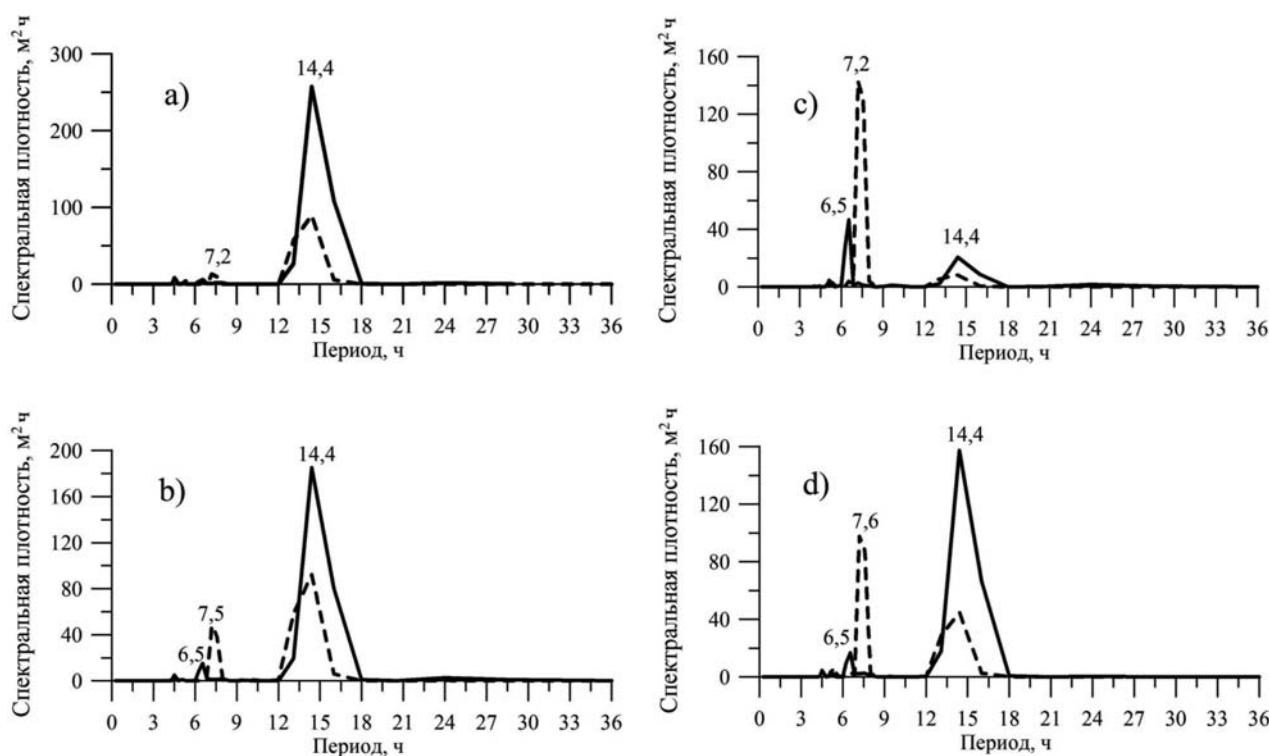


Рис. 5. Периодограммы сейшевых колебаний, вызванных воздействием ветров разных направлений, на северном побережье Азовского моря в пункте Приморско-Ахтарск, рассчитанные с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) вращения Земли

Fig 5. Periodograms of seiche oscillations caused by the impact of winds of different directions on the northern coast of the Sea of Azov at the point of Primorsko-Akhtarsk, calculated taking into account (solid line) and without taking into account (dashed line) the Earth rotation

высокочастотное колебание с периодом 7,5–7,6 ч, имеющее место без учета силы Кориолиса, интенсивнее, чем мода с периодом 6,9 ч – с ее учетом.

Таким образом, вращение Земли уменьшает интенсивность высокочастотных собственных мод и уменьшает их периоды.

Отметим, что периоды, равные 6,5 и 7,4 ч, получены также в работах [Иванов и др., 1994; Корженовская и др., 2022] при решении задачи на собственные значения без учета силы Кориолиса. Период около 7,5 ч получен в работах [Еремеев и др., 2000; Филиппов, 2012; Сабурин, Елизарова, 2017; Корженовская и др., 2022] при решении задач с разными видами начальных возмущений с учетом силы Кориолиса.

Заключение

С использованием численной модели ADCIRC проведено исследование сейшевых колебаний в Азовском море, возникающих в результате воздействия стационарного ветра, имеющего продолжительность 12 ч и ско-

рость 15 м/с. Рассмотрен отклик моря на действие ветров восьми направлений. Выполнены расчеты с учетом ($f > 0$) и без учета ($f = 0$) влияния силы Кориолиса. Анализом результатов численных экспериментов установлено следующее.

В Должанской, а также в расположенных на южном побережье Азовского моря Мысовом и Темрюке учет влияния вращения Земли в большинстве рассмотренных случаев приводит к увеличению максимальных отклонений уровня моря, достигая в Темрюке 50 %. В Приморско-Ахтарске, а также в расположенных на северном побережье Бердянске и Мариуполе, напротив, в большинстве рассмотренных случаев учет силы Кориолиса приводит к ослаблению сейш, максимально в Бердянске – до 44 %. В Таганроге, находящемся на северо-восточной окраине моря в вершине Таганрогского залива, имеют место наибольшие абсолютные значения отклонений уровня моря, но учет влияния вращения Земли не приводит к значительным изменениям максимальных отклонений уровня – они не превышают 21 %.

В случаях $f > 0$ имеет место сдвиг фаз между колебаниями уровня моря по сравнению со случаями $f = 0$. При воздействии З и Ю-З ветров этот сдвиг фаз устойчивый и колебания уровня моря происходят в противофазе, а у сейш, порождаемых действием С и С-З ветров, сдвиг фаз значительно меняется с течением времени и колебания могут происходить как синфазно, так и противофазно.

В целом сейшевые колебания при $f > 0$ более интенсивны на начальной стадии процесса, но быстрее затухают, чем колебания при $f = 0$.

При всех рассмотренных направлениях ветра как при $f > 0$, так и при $f = 0$ генерируется интенсивная мода сейшевых колебаний с периодом, равным 14,4 ч. Вращение Земли увеличивает интенсивность данной моды. Кроме того, учет силы Кориолиса приводит к генерации более высокочастотных мод с периодами 6,5 или 6,9 ч, чем в случаях без учета вращения: периоды 7,2 или 7,5–7,6 ч. При этом высокочастотные колебания более интенсивны при $f = 0$.

Анализ результатов расчетов показал, что вращение Земли оказывает ощутимое влияние на величины амплитуд, модовый состав, характер движения воды сейшевых колебаний в Азовском море. В данном водоеме необходимо учитывать силу Кориолиса при моделировании сейш.

Литература

- Волкова Г. П., Овсянников А. Н. Некоторые особенности колебаний уровня в Азовском, Черном и Балтийском морях // Труды ГОИН. М.: Гидрометеоздат, 1978. Вып. 137. С. 43–46.
- Герман В. Х. Спектральный анализ колебаний уровня Азовского, Черного и Каспийского морей в диапазоне частот от одного цикла за несколько часов до одного цикла за несколько суток // Труды ГОИН. М.: Гидрометеоздат, 1970. Вып. 103. С. 52–73.
- Демышев С. Г., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Анализ влияния постоянного ветра на скорость течений и сейшевые колебания уровня Азовского моря // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 46–54.
- Доценко С. Ф., Иванов В. А. Катастрофические природные явления Азово-Черноморского региона. Севастополь: ЭкоСи-Гидрофизика, 2013. 193 с.
- Еремеев В. Н., Коновалов А. В., Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Моделирование длинных волн в Азовском море, вызванных прохождением циклонов // Океанология. 2000. Т. 40, № 5. С. 658–665.
- Иванов В. А., Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. О сейшах Азовского моря // Метеорология и гидрология. 1994. № 6. С. 105–110.
- Инжебейкин Ю. И. Особенности формирования кратковременных наводнений и экстремальных течений в Азовском море // Труды Государственного океанографического института. 2011. № 213. С. 91–102.
- Корженовская А. И., Медведев И. П., Архипкин В. С. Сейшевые колебания уровня Азовского моря: наблюдения и численное моделирование // Моря России: Вызовы отечественной науки: Тезисы докладов Всерос. науч. конф. (Севастополь, 26–30 сентября 2022 года). Севастополь: МГИ РАН, 2022. С. 95–97.
- Курчатов И. В. Сейши в Черном и Азовском морях // Известия Центрального гидромет. бюро ЦУМОРА. 1925. Вып. 4. С. 149–158.
- Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Математическое моделирование сейшевых колебаний в Азовском море методом конечных элементов // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 5. С. 3–8.
- Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Исследование свободных колебаний жидкости в ограниченном бассейне, представляющем приближенную модель Азовского моря // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 2. С. 16–26. doi: 10.22449/0233-7584-2016-2-16-26.
- Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт // Морской гидрофизический журнал. 2020а. Т. 36, № 3. С. 261–276. doi: 10.22449/0233-7584-2020-3-261-276.
- Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Моделирование сейшевых колебаний в системе севастопольских бухт // Моря России: исследование береговой и шельфовой зон: Тезисы докладов всерос. науч. конф. (XXVIII береговая конференция). Севастополь, 2020б. С. 135–136.
- Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Сейшевые колебания в системе севастопольских бухт // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 5. С. 526–536. doi: 10.31857/S0321059621050126.
- Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В., Алексеев Д. В. Исследование режимов сейшевых колебаний Севастопольской бухты // Океанология. 2023. Т. 63, № 6. С. 916–926. doi: 10.31857/S0030157423060114.
- Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Инжебейкин Ю. И. Влияние сейш на формирование экстремальных уровней и течений в Азовском море // Вестник Южного научного центра. 2008. Т. 4, № 2. С. 46–61.
- Матишов Г. Г., Инжебейкин Ю. И. Численное исследование сейшевых колебаний уровня Азовского моря // Океанология. 2009. Т. 49, № 4. С. 485–493.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. V, Азовское море / Под ред. Н. П. Гоптарева и др. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 236 с.
- Океанографическая энциклопедия. Л.: Гидрометеоздат, 1980 (1974?). 304 с.
- Сабурин Д. С., Елизарова Т. Г. Численное моделирование сейшевых колебаний в Азовском море с использованием сглаженных уравнений гидродинамики // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2017. № 2. С. 74–81.
- Филиппов Ю. Г. Свободные колебания уровня Азовского моря // Метеорология и гидрология. 2012. № 2. С. 78–82.

Фомин В. В., Лемешко Е. М., Лазоренко Д. И. Моделирование морских наводнений в дельте реки Кубань // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 1. С. 52–62. doi: 10.7868/S2073667318010069

Фомин В. В., Полозок А. А. Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. Вып. 27. С. 139–145.

Colvin J., Lazarus S., Splitt M., Weaver R., Taeb P. Wind-driven setup in east central Florida's Indian River Lagoon: Forcings and parametrizations. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 2018. Vol. 213. P. 40–48. doi: 10.1016/j.ecss.2018.08.004

Fomin V. V., Alekseev D. V., Lemeshko E. M., Lazorenko D. I. Simulation and analysis of sea floods in the Don River Delta // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2018. Vol. 43, no. 2. P. 95–102. doi: 10.3103/S106837391802005X

Garratt J. R. Review of drag coefficients over oceans and continents // *Mon. Weather Rev.* 1977. Vol. 105. P. 915–929. doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<0915:RODCOO>2.0.CO;2

Garzon J., Ferreira C. Storm surge modeling in large estuaries: Sensitivity analyses to parameters and physical processes in the Chesapeake Bay // *J. Mar. Sci. Eng.* 2016. Vol. 4(3). Art. 45. doi: 10.3390/jmse4030045

Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. P. *Physics of lakes*. Vol. 2: Lakes as Oscillators. Springer, 2011. 646 p.

Kodomari S. On the studies of the periodic motions in a lake (2): Effect of the lake basin shape on the periodic motion // *J. Faculty Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (Geophysics)*. 1982. Vol. 7, no. 2. P. 185–226.

Luettich R. A., Westerink J. J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX. 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/240474926_Formulation_and_Numerical_Implementation_of_the_2D3D_ADCIRC_Finite_Element_Model_Version_44XX (дата обращения: 13.03.2025).

Luettich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: An Advanced Three-dimensional Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries. Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. 1992. URL: https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/1992_Luettich02.pdf (дата обращения: 13.03.2025).

Manilyuk Yu. V., Cherkosov L. V. The influence of the gulf's geometry on seiche oscillations in an enclosed basin // *Physical Oceanography*. 1997. Vol. 8, iss. 4. P. 217–227. doi: 10.1007/BF02523662

Pavlova A. V., Arkhipkin V. S., Myslenkov S. A. Storm surge modeling in the Caspian Sea using an unstructured grid // *Russ. J. Earth. Sci.* 2020. Vol. 20. ES1006. doi: 10.2205/2019ES000688

Platzman G. W., Rao D. B. The free oscillations of Lake Erie // *Studies on Oceanography* / Ed. K. Yoshida. Tokyo: Univ. Press, 1964. P. 359–382.

Rao D. B. Free gravitational oscillations in rotating rectangular basins // *J. Fluid Mech.* 1966. Vol. 25, iss. 3. P. 523–555. doi: 10.1017/S0022112066000235

Rao D. E., Schwab J. Two dimensional normal modes in arbitrary enclosed basins on a rotating Earth: Application to Lakes Ontario and Superior // *Philos. Trans. R. Soc. A: Mathematical and Physical Sciences*. 1976. Vol. 281, no. 1299. P. 63–96. doi: 10.1098/rsta.1976.0021

Shashank V. G., Manda S., Si S. Impact of varying landfall time and cyclone intensity on storm surges in the Bay of Bengal using ADCIRC model. *J. Earth Syst. Sci.* 2021. Vol. 130. Art. 194. doi: 10.1007/s12040-021-01695-y

Schwab D. J., Rao D. B. Gravitational oscillations of Lake Huron, Saginaw Bay, Georgian Bay, and the North Channel // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, iss. 15. P. 2105–2116. doi: 10.1029/JC082i015p02105

Sebastia A., Proft J., Dietrich J. C., Du W., Bedient P. B., Dawson C. N. Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN+ ADCIRC model // *Coastal Engineering*. 2014. Vol. 88. P. 171–181. doi: 10.1016/j.coastaleng.2014.03.002

Westerink J. J., Luettich R. A., Feyen J. C., Atkinson J. H., Dawson C., Roberts H. J., Powell M. D., Dunion J. P., Kubatko E. J., Pourtaheri H. A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to Southern Louisiana // *Mon. Weather Rev.* 2008. Vol. 136. P. 833–864. doi: 10.1175/2007MWR1946.1

References

Colvin J., Lazarus S., Splitt M., Weaver R., Taeb P. Wind driven setup in east central Florida's Indian River Lagoon: Forcings and parametrizations. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 2018;213:40–48. doi: 10.1016/j.ecss.2018.08.004

Demyshev S. G., Cherkosov L. V., Shul'ga T. Y. Analysis of effects of constant wind on the velocity of currents and seiche oscillations in the Azov Sea level. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2017;42(6): 388–393. doi: 10.3103/S1068373917060048

Dotsenko S. F., Ivanov V. A. Catastrophic natural phenomena of the Azov-Black Sea region. Sevastopol': Ecosi-Hydrophysica; 2013. 193 p. (In Russ.)

Eremeev V. N., Konovalov A. V., Manilyuk Yu. V., Cherkosov L. V. Modeling of long waves in the Sea of Azov generated by cyclone propagation. *Oceanology*. 2000;40(5):616–623.

Filippov Yu. G. Natural fluctuations of the Sea of Azov level. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2012;37(2):126–129. doi: 10.3103/S1068373912020082

Fomin V. V., Polozok A. A. Technology of modeling storm surges and wind waves in the Azov Sea on unstructured grids. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa = Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. 2013;27: 139–145. (In Russ.)

Fomin V. V., Alekseev D. V., Lemeshko E. M., Lazorenko D. I. Simulation and analysis of sea floods in the Don River Delta. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2018;43(2):95–102. doi: 10.3103/S106837391802005X

Fomin V. V., Lemeshko E. M., Lazorenko D. I. Modeling of marine inundations in the Kuban River Delta. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018;11(1):52–62. (In Russ.). doi: 10.7868/S2073667318010069

- Garratt J. R. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Mon. Weather Rev.* 1977;105:915–929. doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<0915:RODCOO>2.CO;2
- Garzon J., Ferreira C. Storm surge modeling in large estuaries: Sensitivity analyses to parameters and physical processes in the Chesapeake Bay. *J. Mar. Sci. Eng.* 2016;4(3):45. doi: 10.3390/jmse4030045
- German V. Kh. Spectral analysis of sea level oscillations in the Azov, Black, and Caspian Seas in the frequency range from one cycle per several hours to one cycle per several days. *Trudy GOIN = Proceedings of State Oceanographic Institute*. Iss. 103. Moscow: Gidrometeoizdat; 1970. P. 52–73. (In Russ.)
- Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. P. Physics of lakes. Vol. 2: Lakes as Oscillators. Springer; 2011. 646 p.
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. *Proekt «Morya SSSR». T. V. Azovskoe more = Project 'Seas of the USSR'. Vol. V, The Sea of Azov*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 1991. 236 p. (In Russ.)
- Inzhebeikin Yu. I. The peculiarities of short-term floods and extremal currents formation in the Azov Sea. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta = Proceedings of N. N. Zubov State Oceanographic Institute*. 2011;213:91–102. (In Russ.)
- Ivanov V. A., Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. The Sea of Azov seiches. *Russian Meteorology and Hydrology*. 1994;6:53–57.
- Kodomari S. On the studies of the periodic motions in a lake (2): Effect of the lake basin shape on the periodic motion. *J. Faculty Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (Geophysics)*. 1982;7(2):185–226.
- Korzhenovskaya A. I., Medvedev I. P., Arkhipkin V. S. Seiche oscillations of the Azov Sea level: observations and numerical modeling. *Morya Rossii: Vyzovy otechestvennoi nauki: Tezisy dokladov Vseros. nauch. konf. (Sevastopol', 26–30 sentyabrya 2022 goda) = Seas of Russia: Challenges of Russian science: Abstracts of the All-Russian scientific conf., (Sevastopol, Sept. 26–30, 2022)*. Sevastopol': MGI RAN; 2022. P. 95–97. (In Russ.)
- Kurchatov I. V. Seiches in the Black and Azov Seas. *Izvestiya Tsentral'nogo gidromet. byuro TsUMORa = Proceed. of the Central Hydrometeorological Bureau of the Central Administration of Maritime Transport*. 1925;4:149–158. (In Russ.)
- Luettich R. A., Westerink J. J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX. 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/240474926_Formulation_and_Numerical_Implementation_of_the_2D3D_ADCIRC_Finite_Element_Model_Version_44XX (accessed: 13.03.2025).
- Luettich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: An Advanced Three-dimensional Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries. Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. 1992. URL: https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/1992_Luettich02.pdf (accessed: 13.03.2025).
- Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. The influence of the gulf's geometry on seiche oscillations in an enclosed basin. *Physical Oceanography*. 1997;8(4):217–227. doi: 10.1007/BF02523662
- Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. Simulation of seiche oscillations in the Sea of Azov, using the finite element technique. *Phys. Oceanogr.* 1995;6(5):325–329. doi: 10.1007/BF02197480
- Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. Investigation of free liquid oscillations in a bounded basin representing an approximate model of the Sea of Azov. *Phys. Oceanogr.* 2016;2:14–23. doi: 10.22449/1573-160X-2016-2-14-23
- Manilyuk Yu. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Investigation of seiche oscillations in the adjacent bays by the example of the Sevastopol and the Quarantine Bays. *Phys. Oceanogr.* 2020;27(3):242–256. doi: 10.22449/1573-160X-2020-3-242-256
- Manilyuk Yu. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Modeling of seiche oscillations in the system of Sevastopol bays. *Morya Rossii: issledovanie beregovoi i shel'fovoi zon: Tezisy dokladov vseros. nauch. konf. (XXVIII beregovaya konferentsiya) = Seas of Russia: study of coastal and shelf zones. Abstracts of the All-Russian scientific conf. (XXVIII coastal conference)*. Sevastopol'; 2020. P. 135–136. (In Russ.)
- Manilyuk Yu. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Seiche oscillations in the system of Sevastopol Bays. *Water Resources*. 2021;48(5):726–736. doi: 10.1134/S0097807821050122
- Manilyuk Yu. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V., Alekseev D. V. Study of seiche oscillations regimes in Sevastopol Bay. *Oceanology*. 2023;63(6):796–805. doi: 10.1134/S0001437023060115
- Matishov G. G., Matishov D. G., Inzhebeykin Yu. I. The influence of seiches on the formation of extreme levels and currents in the Sea of Azov. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 2008;4(2):46–61. (In Russ.)
- Matishov G. G., Inzhebeykin Yu. I. Numerical study of the Azov Sea level oscillations. *Oceanology*. 2009;49(4):445–452. doi: 10.1134/S0001437009040018
- Oceanographic encyclopedia*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1980. 304 p. (In Russ.)
- Pavlova A. V., Arkhipkin V. S., Myslenkov S. A. Storm surge modeling in the Caspian Sea using an unstructured grid. *Russ. J. Earth. Sci.* 2020;20:ES1006. doi: 10.2205/2019ES000688
- Platzman G. W., Rao D. B. The free oscillations of Lake Erie. Yoshida K. (ed.). *Studies on Oceanography*. Tokyo: Univ. Press; 1964. P. 359–382.
- Rao D. B. Free gravitational oscillations in rotating rectangular basins. *J. Fluid Mech.* 1966;25(3):523–555. doi: 10.1017/S0022112066000235
- Rao D. E., Schwab J. Two dimensional normal modes in arbitrary enclosed basins on a rotating Earth: Application to Lakes Ontario and Superior. *Philos. Trans. R. Soc. A: Mathematical and Physical Sciences*. 1976;281(1299):63–96. doi: 10.1098/rsta.1976.0021
- Saburin D. S., Elizarova T. G. Numerical modeling of seiche oscillations in the Sea of Azov using smoothed hydrodynamic equations. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa = Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. 2017;2:74–81. (In Russ.)

Schwab D. J., Rao D. B. Gravitational oscillations of Lake Huron, Saginaw Bay, Georgian Bay, and the North Channel. *J. Geophys. Res.* 1977;82(15):2105–2116. doi: 10.1029/JC082i015p02105

Sebastia A., Proft J., Dietrich J. C., Du W., Bedient P. B., Dawson C. N. Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN+ ADCIRC model. *Coastal Engineering*. 2014;88:171–181. doi: 10.1016/j.coastaleng.2014.03.002

Shashank V. G., Manda S., Si S. Impact of varying landfall time and cyclone intensity on storm surges in the Bay of Bengal using ADCIRC model.

J. Earth Syst. Sci. 2021;130:194. doi: 10.1007/s12040-021-01695-y

Volkova G. P., Ovsyannikov A. N. Some features of level fluctuations in the Azov, Black and Baltic Seas. *Trudy GOIN = Proceedings of State Oceanographic Institute*. Iss. 137. Moscow: Gidrometeoizdat; 1978. P. 43–46. (In Russ.)

Westerink J. J., Luettich R. A., Feyen J. C., Atkinson J. H., Dawson C., Roberts H. J., Powell M. D., Dunion J. P., Kubatko E. J., Pourtaheri H. A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to Southern Louisiana. *Mon. Weather Rev.* 2008;136:833–864. doi: 10.1175/2007MWR1946.1

Поступила в редакцию / received: 15.08.2024; принята к публикации / accepted: 08.11.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Манилюк Юрий Владимирович

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник отдела теории волн

e-mail: uvmsev@yandex.ru

Фомин Владимир Владимирович

д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования

e-mail: fomin.dntmm@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Manilyuk, Yuri

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher

Fomin, Vladimir

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department of Computing Technologies and Mathematical Modeling

УДК 504.455; 519.688; 528.88

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ И ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АБИОТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗУЧЕННЫХ ОЗЕР ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. А. Кондратьев, С. Д. Голосов, И. С. Зверев, А. М. Расулова*

*Институт озераведения РАН – СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), *arasulova@limno.ru*

Целью исследования является усовершенствование методики дистанционной оценки термогидродинамических характеристик неизученных и малоизученных озер северных территорий нашей страны применительно к задаче ретроспективных и прогностических расчетов с использованием методов математического моделирования. Объектами изучения являются озерные регионы азиатской части России, расположенные в пределах зоны многолетней мерзлоты. Концептуально методика дистанционной оценки сводится к следующим шагам. На первом этапе с помощью камеральных методов определяются географические координаты озера и его площадь. Далее строятся геостатистические зависимости средней глубины водоема от площади акватории, по которым рассчитывается средняя глубина. Данные метеорологического реанализа в совокупности с глубиной водоема подаются на вход одномерной модели FLake и являются основой ретроспективной оценки характеристик озера. Оценка последствий климатических изменений к концу 21 века происходит на основе сценариев выбросов в атмосферу парниковых газов SSP. Ретроспективные и прогностические расчеты гидротермодинамических характеристик неизученных водных объектов на основе модели FLake выполняются без дополнительной ее верификации, так как модель, используемая в практике прогноза погоды Росгидромета, априори применима для территории России. Выполнены имитационные гидротермодинамические расчеты для репрезентативных точек рассмотренных озерных регионов в пределах зоны многолетней мерзлоты. Показано, что предложенная методика оценки абиотических характеристик неизученных малых и средних озер позволяет не только рассчитывать ретроспективную динамику термодинамических характеристик водной толщи и донных отложений, но и давать оценку их возможных изменений в будущем при реализации различных сценариев изменения климата в азиатской части России.

Ключевые слова: озерный регион; гидротермодинамические характеристики; математическая модель; климат; реанализ; прогноз

Для цитирования: Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С., Расулова А. М. Ретроспективная и прогностическая оценка абиотических характеристик неизученных озер зоны многолетней мерзлоты азиатской части России с использованием

S. A. Kondratyev, S. D. Golosov, I. S. Zverev, A. M. Rasulova*. RETROSPECTIVE AND PROGNOSTIC ASSESSMENT OF ABIOTIC CHARACTERISTICS OF UNSTUDIED LAKES IN THE PERMAFROST ZONE OF THE ASIAN PART OF RUSSIA USING MATHEMATICAL MODELING

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *arasulova@limno.ru*

The aim of the study is to improve the methodology of remote assessment of hydrothermodynamic characteristics of unstudied and poorly studied lakes in northern territories of our country as applied to the task of retrospective and prognostic calculations using mathematical modeling methods. The objects of study are lake regions in the permafrost zone in the Asian part of Russia. Conceptually, the remote sensing methodology is reduced to the following steps. At the first stage, the geographical coordinates of the lake and its area are determined using desktop methods. Further, geostatistical dependences of the average depth of the lake on the water area are plotted, from which the average depth is calculated. The meteorological reanalysis data together with the lake depth are fed into the one-dimensional FLake model and form the basis for retrospective assessment of the lake characteristics. The effects of climate change by the end of the 21st century are estimated based on SSP greenhouse gas emission scenarios. Retrospective and prognostic calculations of hydrothermodynamic characteristics of unstudied water bodies based on the FLake model are performed without its additional verification, since the model used in the practice of weather forecasting by Roshydromet is a priori applicable for the territory of Russia. Hydrothermodynamic simulations were performed for representative points in the lake regions within the permafrost zone. It is shown that the proposed methodology for assessing the abiotic characteristics of unstudied small and medium-sized lakes allows not only to calculate the retrospective dynamics of thermodynamic characteristics of the water column and bottom sediments, but also to assess their possible changes in the future under different climate change scenarios in the Asian part of Russia.

Keywords: lake region; hydrothermodynamic characteristics; mathematical model; climate; reanalysis; forecast

For citation: Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Rasulova A. M. Retrospective and prognostic assessment of abiotic characteristics of unstudied lakes in the permafrost zone of the Asian part of Russia using mathematical modeling. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 19–32. doi: 10.17076/lim2062

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation project 24-27-00067.

Введение

На современных спутниковых снимках в пределах Российской Федерации дешифрируется ~ 3,8 млн естественных водоемов. Только в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) их 3,3 млн (~ 88 % от общего числа по стране) [Измайлова, 2016]. Водные объекты этих территорий относятся к категории малоизученных из-за их труднодоступности и невозможности выполнения регулярных контактных измерений морфометрических,

термогидродинамических и других характеристик. Сказанное негативно влияет на планирование хозяйственной деятельности в северных регионах, а также на научную обоснованность прогнозов возможных изменений термических характеристик озёр и их донных отложений в условиях климатических изменений. Труднодоступность озёр в зоне ММП делает традиционные методы исследования малоэффективными. Современные спутниковые технологии и методы математического моделирования становятся ключевыми инструментами для

изучения этих объектов [Косиков и др., 2019; Полищук и др., 2024]. Отсутствие инструментов и методик количественной оценки морфометрических параметров неисследованных озер многолетней мерзлоты, в частности, затрудняет точную оценку их термического режима, который напрямую влияет на текущее состояние их экосистем.

В Институте озероведения РАН разработана методика оценки абиотических характеристик неизученных озер северных территорий нашей страны по данным спутниковой съемки с использованием геостатистических методов анализа морфометрических параметров озер и результатов математического моделирования термогидродинамики (ТГД) водных объектов [Zverev et al., 2023]. При этом не требуются контактные измерения, что крайне важно для труднодоступных и малоизученных северных территорий нашей страны. Указанная методика использована для оценки особенностей и закономерностей формирования ТГД-характеристик озер, расположенных в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) на европейской территории России [Зверев и др., 2023]. Целью настоящего исследования является адаптация методики применительно к задаче ретроспективных и

прогностических расчетов абиотических параметров неизученных озер азиатской части зоны многолетней мерзлоты России с использованием методов математического моделирования.

Объектами исследования являются малые и средние (площадью до 100 км²) континентальные озера, находящиеся в зоне залегания многолетнемерзлых пород различной мощности азиатской части России. В соответствии с классификацией, предложенной в [Румянцев и др., 2017; Измайлова, 2018], эту зону практически полностью покрывают следующие двенадцать озерных регионов: 1 – Прибрежные равнины Карского моря, 2 – Прибрежные равнины моря Лаптевых, 3 – Прибрежные равнины Восточно-Сибирского моря, 4 – Среднесибирское плоскогорье, 5 – Аккумулятивные, аккумулятивно-денудационные и озерно-аллювиальные равнины таежной зоны, 6 – Восточный склон Уральской горной страны, 7 – Алтайско-Саянская горная страна, 8 – Байкальская горная страна, 9 – Горные области Северо-Восточной Сибири и севера Дальнего Востока, 10 – Плато Путорана, 11 – Горы Бырранга и Северной Земли, 12 – Вулканические области Дальнего Востока. Приведенная выше нумерация озерных регионов использована на рис. 1 и далее.

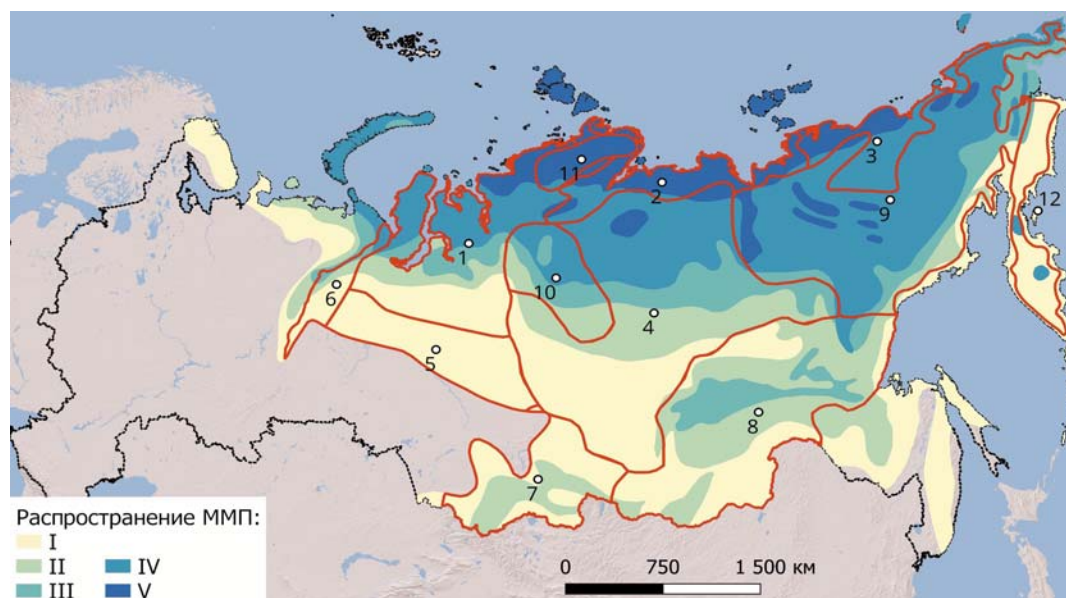


Рис. 1. Озерные регионы азиатской части России, находящиеся в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП):

I – зона редкоостровного, островного и массивно-островного распространения ММП мощностью мерзлотной толщи 0–100 м; зона сплошного распространения ММП: II – мощностью 50–300 м, III – мощностью 100–400 м, IV – мощностью 200–600 м, V – мощностью 400–900 м и ниже. Красная линия – границы озерных регионов [Измайлова, 2018]; черная линия – границы РФ; ○ – центры соответствующих озерных регионов

Fig. 1. Lake regions of the Asian part of Russia located in the permafrost zone:

I – zone of sparse-island, island and massive-island distribution of permafrost thickness 0–100 m, zone of continuous distribution of permafrost: II – thickness 50–300 m, III – thickness 100–400 m, IV – thickness 200–600 m, V – thickness 400–900 m and below. Red line – borders of lake regions [Izmailova, 2018]; black line – borders of the Russian Federation; ○ – centroids of the corresponding lake regions

Границы распространения ММП построены на основе материалов Национального атласа России [Национальный..., 2007]. Следует помнить, что границы и типы мерзлоты существенно зависят от климатических воздействий и постоянно уточняются [Obu et al., 2019].

В основу районирования на озерные регионы положен генетический принцип, то есть единство геологической истории происхождения большинства озерных котловин в пределах определенной территории. Генетический принцип позволяет учитывать сложное сочетание зональных и аazonальных факторов и устанавливает временную точку отсчета эволюции озер путем лимногенеза в пределах выделенной территории при энергетическом потенциале тех широт, в пределах которых этот регион располагается [Реки..., 2012; Румянцев и др., 2017; Измайлова, 2018]. При выделении региона учитывается также его озерность. Единое происхождение котловин позволяет выявить общие типологические показатели озер и выделить диапазон их изменчивости, определяемый особенностями внутренней структуры озерного региона. В пределах озерного региона наблюдается общность по таким основным компонентам природной среды, как геология и климат. Также здесь учтены особенности геологического развития территории.

Подробное описание озерных регионов, представленных на рис. 1, содержится в работах [Румянцев и др., 2017; Измайлова, 2018].

Методы и модели

Общая схема ретроспективной и прогностической оценки характеристик неизученных озер с использованием дистанционных методов и математического моделирования представлена на рис. 2. Следует отметить, что в зависимости от целей и задач того или иного исследования блоки схемы могут быть заменены на аналогичные или полностью отсутствовать.

Основные этапы выполнения дистанционной оценки параметров водоема сводятся к следующему:

- с использованием средств дистанционного зондирования Земли дешифрируется интересующий водный объект, определяются его географические координаты и площадь водной поверхности;
- для определения средней глубины исследуемого водоема строятся геостатистические взаимосвязи на основе общедоступных данных (например, баз данных WORDLAKE и HydroLAKES, а также других литературных источников) между морфометрическими



Рис. 2. Схема ретроспективной и прогностической оценок абиотических характеристик неизученных озер с использованием методов дистанционного зондирования и математического моделирования

Fig. 2. Scheme of retrospective and prognostic assessments of abiotic characteristics of unstudied lakes using remote sensing and mathematical modelling

характеристиками однородной группы водных объектов, прежде всего $H = f(A)$, где H – средняя глубина водоема, A – площадь его акватории;

- по географическим координатам водного объекта из баз данных метеорологического реанализа (например, ERA 5 или NCEP/NCAR) или на основе метеонаблюдений извлекается ретроспективная метеоинформация требуемого разрешения;

- метеопараметры и рассчитанная средняя глубина водоема подаются на вход модели FLake с целью получения ретроспективной оценки характеристик водного объекта;

- для оценки последствий возможных климатических изменений к концу 21 века могут быть использованы сценарии выбросов в атмосферу парниковых газов SSP (Shared Socio-economic Pathway¹). Прогностические сценарии изменения метеорологических характеристик для изучаемой территории основываются на результатах пересчета сценариев выбросов парниковых газов SSP в метеорологические параметры региона исследований по моделям общей циркуляции атмосферы и океана. Метеопараметры, рассчитанные по моделям общей циркуляции атмосферы и океана в совокупности с геостатистической оценкой глубины водоема, позволяют получить прогностические оценки характеристик водного объекта.

Построенная таким образом схема оценки и прогноза изменений характеристик разнотипных озер различного генетического происхождения может применяться для малых и средних неизученных и малоизученных водоемов России, включая и водоемы зоны многолетней мерзлоты. При условии дополнения модели FLake соответствующими программными модулями по приведенной выше схеме могут быть оценены и химико-биологические характеристики водоемов, такие как кислородный режим, биомасса и первичная продукция водорослей, прозрачность воды и др.

Одним из основных элементов предлагаемой методики оценки абиотических характеристик неизученных озер зоны многолетней мерзлоты является гидрофизическая модель озера FLake², разработанная совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, Института водной экологии

и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [Golosov, Kirillin, 2010; Mironov et al., 2010; Kirillin et al., 2011]. FLake представляет собой универсальную параметризованную одномерную математическую модель ТГД-процессов в озере, в которой реализованы результаты, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института озероведения РАН, а также мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время FLake служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов – экологов и гидрометеорологов. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и международного Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [Mironov, 2008]. Кроме того, прогностическая система COSMO³, используемая и в нашей стране для составления прогнозов погоды на всей территории РФ, также включает FLake в качестве средства оценки влияния пресноводных озер на локальный климат по всему миру. Из этого следует, что модель априори может использоваться на неизученных водоемах озерных регионов, рассматриваемых в настоящей работе без дополнительной верификации и апробации. На рис. 3 схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе «снег – лед – водная масса – донные отложения», временная динамика которого рассчитывается в модели.

В соответствии с рис. 3 озеро в модели имеет в период открытой воды (Лето) трехслойную структуру. Сверху расположен верхний перемешанный слой толщиной h , в котором из-за постоянно присутствующего ветрового/конвективного перемешивания температура T_s постоянна по глубине. Ниже перемешанного слоя находится устойчиво стратифицированная по плотности водная масса толщиной $(D-h)$, в которой температура воды уменьшается до значения T_D – температуры воды на границе раздела вода-дно. Устойчивая плотностная стратификация препятствует проникновению перемешивания, а вместе с ним и тепла в придонную область.

¹ Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения: 15.03.2024).

² ТГД модель Flake. URL: <https://www.lakemodel.net> (дата обращения: 15.03.2024).

³ Прогностическая система COSMO, Росгидромет. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (дата обращения: 15.03.2024).

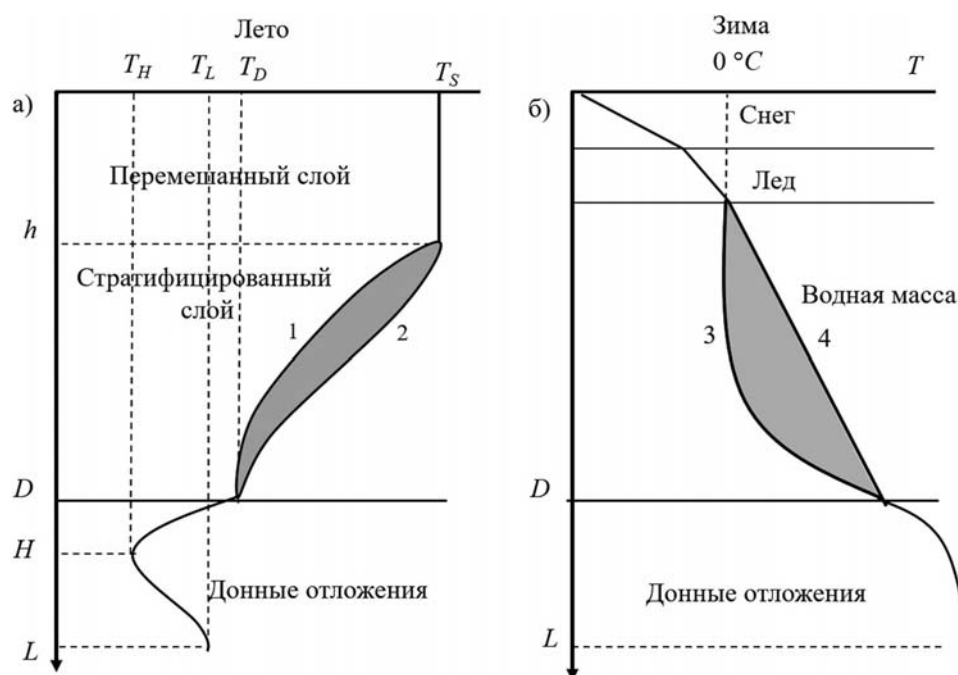


Рис. 3. Схема вертикального профиля температуры (T) в системе «снег – лед – водная масса – донные отложения», реализованная в модели FLake: обострение (1) и сглаживание (2) температурного градиента летом, профиль температуры в начале ледостава (3) и в период подледного прогрева (4)

Fig. 3. Scheme of the vertical temperature profile (T) in the system 'snow – ice – water mass – bottom sediments' realised in the FLake model: sharpening (1) and smoothing (2) of the temperature gradient in summer, the temperature profile at the beginning of ice break-up (3) and during the period of sub-ice warming (4)

В те моменты, когда перемешивание все-таки достигает дна – под воздействием сильного ветра либо плотностной весенней/осенней конвекции – температура по всей глубине озера выравнивается и становится равной ее среднему значению.

Профили температуры в стратифицированной области водной массы различаются в зависимости от ветрового перемешивания и поведения верхнего перемешанного слоя. При усилении перемешивания и соответствующего заглубления перемешанного слоя в стратифицированную водную массу на нижней границе перемешанного слоя происходит обострение температурного градиента (линия 1 на рис. 3). В ситуации, когда воздействие ветра снижается, происходит вырождение верхнего перемешанного слоя со сглаживанием градиента температуры на его нижней границе (линия 2 на рис. 3). В модели предусмотрена процедура плавной смены типа профиля в области, ограниченной линиями 1 и 2, что предотвращает резкие скачки потока тепла на нижней границе перемешанного слоя и соответствующие скачки его температуры.

В донных отложениях (ДО) рассматривается верхний теплоактивный слой толщиной ($L-D$). В пределах этого слоя профиль температуры испытывает сезонные колебания, которые затухают на глубине нижней границы слоя L . Температура на этой глубине T_L остается постоянной в течение всего года. Значения L и T_L являются эмпирическими параметрами модели и определяются по данным натурных наблюдений. В периоды весенне-летнего прогрева и осеннего охлаждения профиль температуры в ДО не является монотонным и имеет экстремум – минимальное/максимальное значение температуры в пределах теплоактивного слоя. Глубина экстремума H в ДО и температура T_H на этой глубине являются переменными модели и рассчитываются из соответствующих уравнений [Golosov, Kirillin, 2010].

В течение ледостава (Зима) озеро в модели имеет четырехслойную структуру – снежный покров, лед, водную массу и донные отложения. Нарастание и таяние льда, а также накопление и таяние на нем снега рассчитывается в соответствующих модулях модели.

Между нижней границей льда и донными отложениями расположена устойчиво стратифицированная по плотности водная масса, имеющая из-за особенностей уравнения состояния пресной воды обратную температурную стратификацию, т. е. температура воды растет от границы раздела вода-лед, где поддерживается ее нулевое значение в течение всего ледостава, до температуры T_D на дне. В ДО к началу ледостава, как правило, формируется монотонное распределение температуры, которая увеличивается от величины T_D на границе раздела вода-дно до T_L – температуры на нижней границе теплоактивного слоя.

Термический режим озера в зимний период имеет ряд особенностей. Дело в том, что осенне-зимнее охлаждение в озерах происходит в основном через границу раздела вода-атмосфера, что приводит к ускоренной потере тепла водной массой по сравнению с ДО. В результате к моменту образования льда донные отложения становятся теплее водной массы, и начинается так называемый «подледный прогрев» озера, приводящий к временной изменчивости вида профиля температуры в водной массе. Профиль температуры в начале ледостава имеет вид формы 3 (рис. 3). По мере подледного прогрева профиль постепенно трансформируется к виду, представленному линией 4, т. е. практически к линейному распределению, что свидетельствует об установлении в озере в течение ледостава квазистационарного вертикального переноса тепла. В модели предусмотрена процедура расчета трансформации профиля температуры формы 3 (рис. 3) к линейному распределению.

Модель основана на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности как в водной массе, так и в донных отложениях. При этом вертикальные профили описываются автомодельными представлениями в обеих средах, что позволяет избежать расчета/задания коэффициентов турбулентного/молекулярного обмена, а саму систему уравнений свести к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Последнее делает модель высокоэффективной с точки зрения затрат вычислительного времени.

Несмотря на обширные возможности модели и ее универсальность, водные объекты, к которым применяется одномерная модель FLake, должны удовлетворять следующим условиям:

- протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и настолько мала, чтобы вторичная

ветровая циркуляция играла очень существенную роль;

- дно должно быть более или менее ровным и горизонтальным, чтобы его можно было аппроксимировать горизонтальной плоскостью;

- адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание.

На основе изложенного значение максимальной площади изучаемого озера определено в 100 км².

При наличии необходимой исходной информации модель рассчитывает следующие характеристики выбранного озера:

- теплоперенос между атмосферой, льдом, водой и донными отложениями;

- вертикальный профиль температуры воды, температуру у поверхности озера и у дна;

- профиль температуры в донных отложениях;

- дату образования ледового покрова, его продолжительность и толщину;

- слой сезонного оттаивания донных отложений в озерах зоны вечной мерзлоты.

В качестве примеров использования модели FLake для оценки параметров водной массы и донных отложений озер зоны многолетней мерзлоты в нашей стране можно назвать результаты работ [Zdorovenkov et al., 2020; Zverev et al., 2023; Kondratyev et al., 2024].

В настоящем исследовании для озерных регионов зоны многолетней мерзлоты, занимающих большую часть азиатской части нашей страны (рис. 1), использованы геостатистические зависимости глубины озера (H) от его площади (A), полученные в результате статистической обработки баз данных WORLDLAKE [Рянжин, Ульянова, 2000] и HydroLAKES [Messenger et al., 2016]. В таблице приведены зависимости $H = f(A)$ для различных озерных регионов, а также географические координаты их центроидов. Каждый центроид (центр тяжести) представляет собой барицентр слоя озерного региона, его координаты – это средние значения координат всех узлов полигона, которые определены с использованием программы QGIS.

Для задания атмосферного воздействия («форсинга») при моделировании ТГД-процессов в озерах в настоящей работе использовались данные метеорологического реанализа семейства ERA5¹, представляющего собой ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, которые обновляются ежедневно с задержкой около 5 дней.

¹ ERA5. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (дата обращения: 15.03.2024).

Данные доступны с 1940 года по настоящее время. ERA5 предоставляет почасовые оценки для большого числа параметров атмосферы, океанических волн и поверхности земли. Временной шаг между сроками «наблюдений» составляет 6 часов, пространственное разрешение реанализа – 0,25° по широте и долготе. Выборка необходимых для расчетов данных производится по координатам расчетной точки. Для облегчения работы многих климатических приложений рассчитываются также и среднемесячные значения гидрометеорологических параметров. В настоящей работе данные реанализа использовались для расчета ТГД-характеристик озер для интервала времени 1940–2015 гг., после чего в качестве входной гидрометеорологической информации в модель FLake служили прогностические оценки климатических воздействий.

Для оценки последствий возможных климатических изменений и их влияния на характеристики водоемов использованы так называемые SSP сценарии эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу [IPCC..., 2021; Семенов, Гладильщикова, 2022]. Принималось, что до конца 21 века выбросы парниковых газов будут осуществляться по сценариям SSP-2.6 или SSP-8.5, т. е. по лучшему или худшему с точки зрения воздействия на окружающую среду. Сценарий SSP-2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO₂) начали неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы метана (CH₄) должны уменьшиться наполовину, при этом уровень выбросов диоксида серы (SO₂) составит примерно 10 % от уровня 1980–1990 годов. В сценарии SSP-8.5 выбросы продолжают расти в течение всего 21 века теми

же темпами, что и сейчас. Цифры в аббревиатурах сценариев (2.6 и 8.5) указывают на дополнительное количество энергии (Вт/м²), которое будет аккумулировано атмосферой в результате выбросов парниковых газов. Значения метеорологических параметров (коротковолновая радиация, температура воздуха и давление водяного пара на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м, облачность, осадки), соответствующих реализации сценариев социально-экономической деятельности человека (SSP) в изучаемом регионе на период до 2100 года, рассчитаны с использованием климатической модели CanESM5. Модель входит в число ансамбля из 37 глобальных климатических моделей, принявших участие в 6-й фазе международного проекта сравнения объединенных моделей CMIP6¹. Выбор именно этой модели объясняется тем, что она позволяет получать метеорологические характеристики необходимого разрешения, которые являются входными параметрами в модель FLake. Расчеты с использованием климатических сценариев изменения гидрометеорологических характеристик выполнялись для временного интервала с 2016 по 2100 г.

Результаты и обсуждение

Расчеты ТГД-характеристик озер выполнялись для точек с координатами центроидов озерных регионов и средними значениями глубин озер рассматриваемого региона (рис. 1, табл.)

¹ CMIP6 climate projections. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=overview> (дата обращения: 15.03.2024).

Геостатистические зависимости средней глубины озера от его площади $H = f(A)$, медианные значения средней глубины озера H_{cp} и географические координаты центроидов для озерных регионов

Geostatistical dependences of mean lake depth on its area $H = f(A)$, median values of mean lake depth H_{sr} and geographical coordinates of centroids for lake regions

№ региона Region no.	Географические координаты центроидов Geographical coordinates of centroids	$H = f(A)$	$H_{cp}, м$
1	N68.828103°, E80.882440°	$H = 4,1285 A^{0,1059}$	3,7
2	N69.314860°, E153.976037°	$H = 5,2117 A^{0,1736}$	4,6
3	N72.619205°, E115.653177 °	$H = 4,4222 A^{0,112}$	3,9
4	N63.974322°, E109.940358°	$H = 5,1943 A^{0,1701}$	4,3
5	N61.34931°, E78.80041°	$H = 3,5516 A^{0,1037}$	3,2
6	N63.98283°, E62.53119°	$H = 5,2418 A^{0,1545}$	4,4
7	N53.15034°, E93.28403°	$H = 5,9311 A^{0,1355}$	5,2
8	N55.905941°, E120.486119°	$H = 4,0130 A^{0,1209}$	3,5
9	N65.58758°, E149.87252°	$H = 6,1950 A^{0,1376}$	5,0
10	N66.887258°, E95.509105°	$H = 8,0389 A^{0,173}$	6,7
11	N74.905214°, E100.811096°	$H = 8,9658 A^{0,1751}$	7,9
12	N59.064097°, E165.076459°	$H = 4,6982 A^{0,0667}$	4,2

за период 1940–2100 гг. Ретроспективная динамика среднегодовой температуры водной массы и максимальной толщины ледового покрова за период 1940–2015 гг., представленная на рис. 4 для всех озерных регионов, рассчитывалась с использованием информации гидрометеорологического реанализа. Далее с 2016 до 2100 г. в качестве входной информации служили данные климатических прогнозов (SSP-2.6 и SSP-8.5). Для проведения последующих имитационных расчетов выполнялась стыковка гидрометеорологической информации реанализа и климатических прогнозов. Адаптации сценариев SSP к ретроспективным данным реанализа проводились с использованием метода корректировки значений параметров реанализа (1940–2015 гг.) и прогностических SSP сценариев (2016–2100 гг.) [Кондратьев, Бовыкин, 2003].

Нетрудно видеть, что согласно выполненным расчетам экстремальные условия прогрева водной массы водоемов характерны для озерных регионов 7 (Алтайско-Саянская горная страна) с максимальным прогревом озер и 11 (Горы Бырранга и Северной Земли) с минимальным прогревом. Среднегодовая температура воды в озерах этих регионов в 1940 г. составила соответственно 8,25 и 0,63 °С, а в 2015 г. – 8,76 и 0,89 °С. При этом к 2100 г. среднегодовой прогрев озер региона 7 может достичь значений 11,40 °С при реализации климатического сценария SSP 8.5 (возрастет на 38 % по отношению к 1940 г.). Согласно этому сценарию, рост эмиссии парниковых газов в атмосферу Земли продолжается теми же темпами, что и сейчас. В регионе 11 увеличение среднегодовой температуры воды может составить 625 % по отношению к 1940 г. (рис. 4).

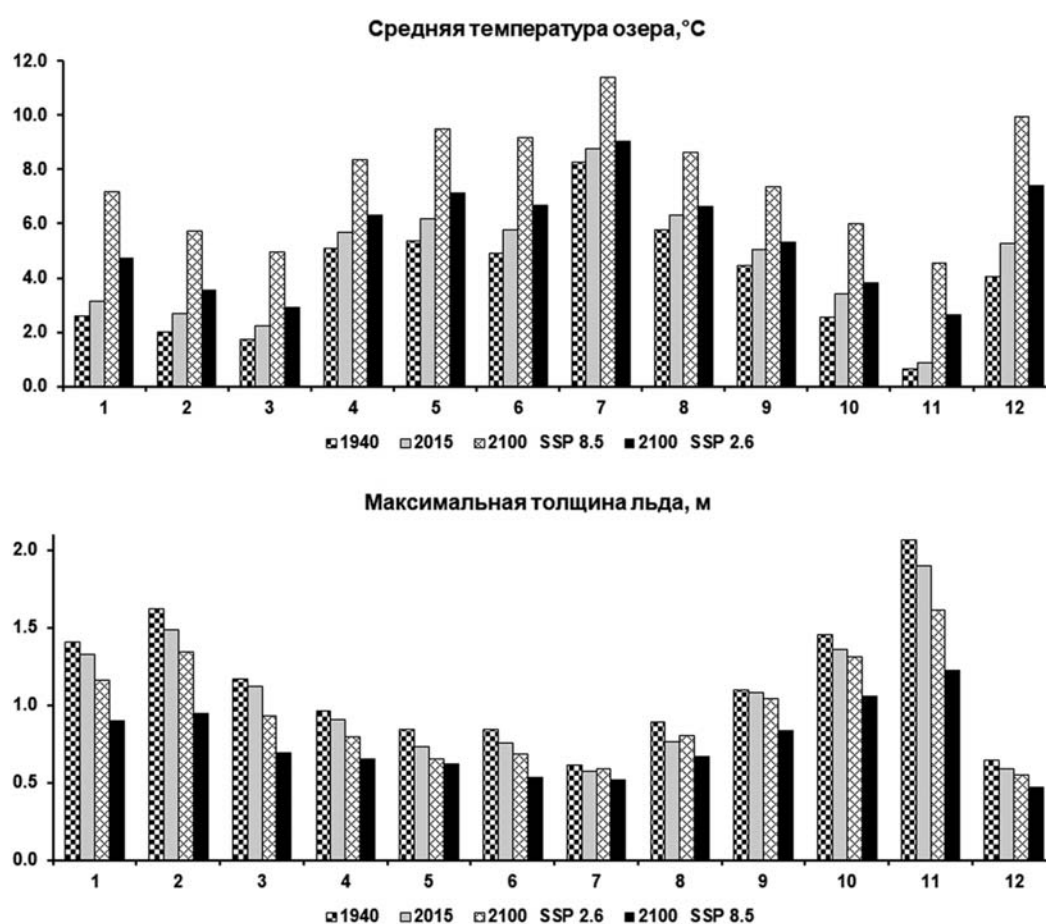


Рис. 4. Результаты расчета среднегодовых значений температуры воды и максимальной толщины льда в 1940, 2015 и 2100 годах (по климатическим сценариям SSP 2.6 и SSP 8.5) для 12 гипотетических озер, расположенных в центроидах изучаемых озерных регионов

Fig. 4. Results of calculation of mean annual values of water temperature and maximum ice thickness in 1940, 2015 and 2100 (under SSP 2.6 and SSP 8.5 climate scenarios) for 12 hypothetical lakes located in the centroids of the studied lake regions

Прямо противоположная ситуация имеет место при расчетах толщины ледяного покрова. В регионе 7 снижение значения максимальной толщины льда при реализации наиболее неблагоприятного сценария SSP 8.5 составит 0,09 м (–14,8 %) по отношению к 1940 году. В регионе 11 указанное снижение может достигнуть 0,83 м (–40,3 %). Представленные на рис. 4 результаты моделирования позволяют предположить, что ТГД-характеристики водных объектов в озерных регионах с континентальным климатом (4–10) менее восприимчивы к возможным климатическим воздействиям по сравнению с приморскими регионами (1–3, 11, 12). Ситуация с прогревом и толщиной льда озер в рассматриваемых озерных регионах зоны многолетней мерзлоты полностью соответствует современным представлениям о потеплении в северных районах нашей страны. Толщина льда уменьшается во всех водоемах, причем образование, нарастание и таяние льда в озерах является главным образом результатом взаимодействия водной массы с атмосферой.

Более детально рассчитанная ретроспективная и прогностическая динамика ТГД-характеристик (среднегодовой температуры водной массы и максимальной толщины ледового покрова) для гипотетических озер, расположенных в центроидах озерных регионов 7 и 11 с экстремальной реакцией на климатические изменения, представлена на рис. 5.

Как отмечено выше, согласно проведенным расчетам, среднегодовые ТГД-характеристики озер региона 7 (Алтайско-Саянская горная страна) практически не изменились за период с 1940 года по настоящее время и слабо реагируют на климатические изменения по экологически благополучному сценарию SSP 2.6. В случае если выбросы парниковых газов продолжают расти в 21 веке теми же темпами, что и сейчас (сценарий SSP 8.5), прогрев водной массы может увеличиться на 37 % по сравнению с ситуацией 1940 г. Озерный регион 11 (Горы Бырранга и Северной Земли), подверженный более сильному воздействию океана, демонстрирует существенную ретроспективную

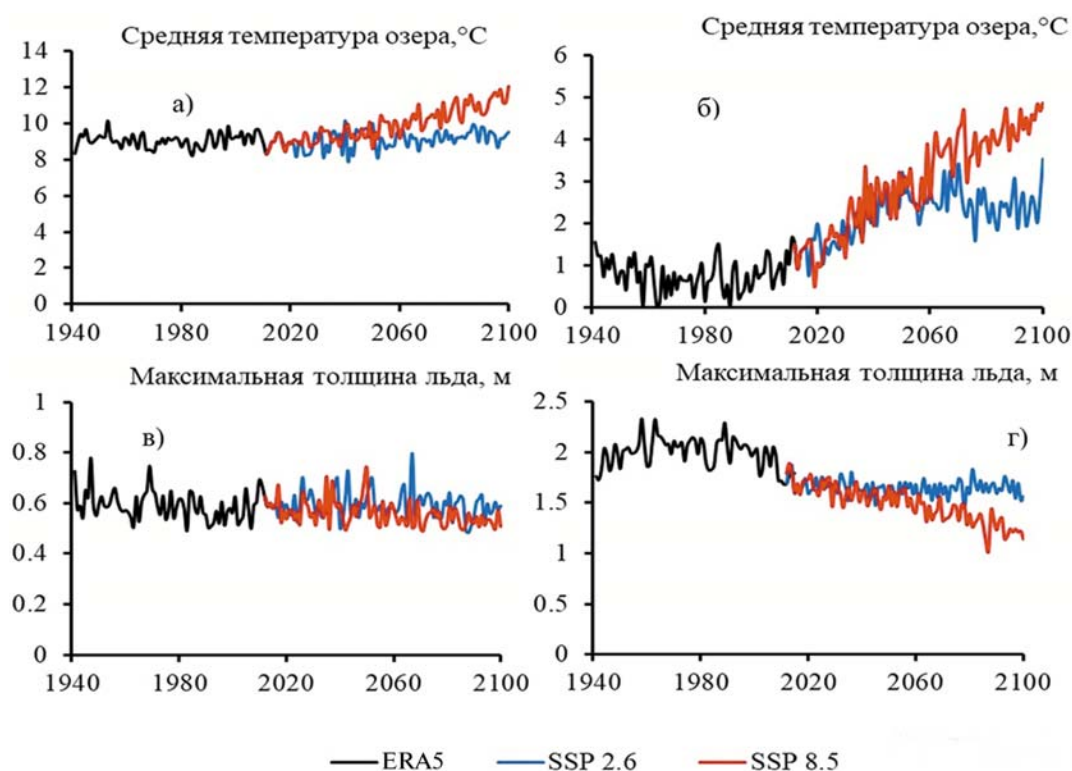


Рис. 5. Ретроспективная (ERA5) и прогностическая (SSP 2.6 и SSP 8.5) оценки динамики среднегодовых ТГД-характеристик (среднегодовая температура водной массы и средняя толщина ледового покрова) для озер, расположенных в центроидах областей 7 (а, в) и 11 (б, г), за период 1940–2100 гг.

Fig. 5. Retrospective (ERA5), and prognostic (SSP 2.6 and SSP 8.5) estimates of the dynamics of mean annual THD characteristics (mean annual water mass temperature and mean ice cover thickness) for lakes located in the centroids of regions 7 (a, в) and 11 (б, г) for the period 1940–2100

нестабильность ТГД-характеристик, проявляющаяся в том, что средняя температура воды в 1960–1990 гг. иногда снижалась до 0 °С. Последующее ретроспективное возрастание температуры воды плавно переходит в прогностические оценки по обоим сценариям и продолжается до середины 21 века. После этого результаты расчета по экологически благоприятному сценарию SSP 2.6 стабилизируются около значения среднегодовой температуры воды 2,7 °С и максимальной толщины льда 1,6 м. Реализация неблагоприятного сценария SSP 8.5 приведет к увеличению среднегодовой температуры до 4,6 °С и уменьшению

максимальной толщины ледового покрова до 1,2 м к концу столетия.

Пример ретроспективной и прогностической оценки внутригодовой динамики ТГД-характеристик на примере потока тепла через дно и толщины слоя сезонного оттаивания (ССО) для тех же точек областей 7 и 11 для условий 2015 и 2100 гг. представлен на рис. 6.

В связи с очевидным влиянием возможного потепления климата на динамику прогрева озер и толщину ледового покрова в них возникает вопрос о воздействии такого потепления на многолетнемерзлые породы, которые являются составной частью донных отложений.

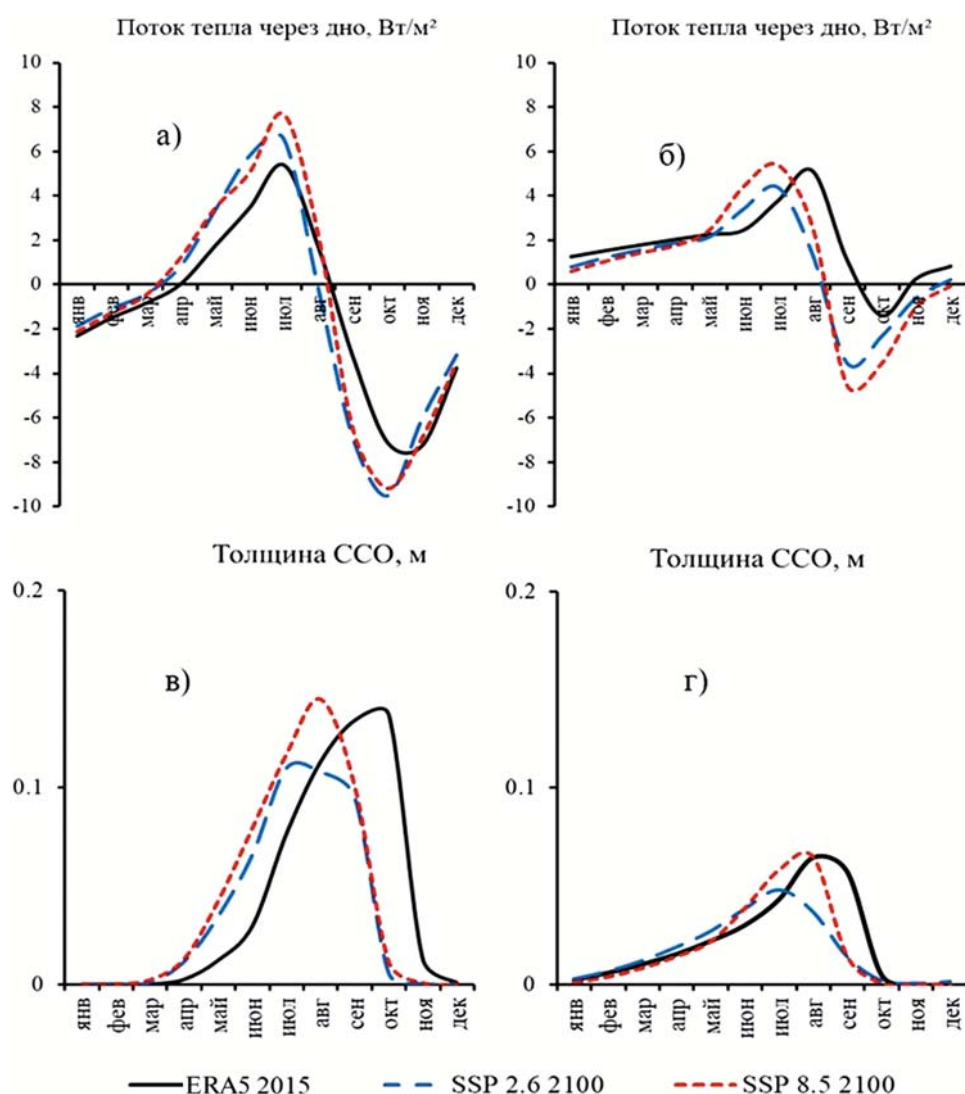


Рис. 6. Ретроспективная (ERA5 2015 г.) и прогностическая (SSP 2.6 2100 г. и SSP 8.5 2100 г.) оценки внутригодовой динамики потока тепла через дно и толщин ССО для озер, расположенных в центроидах областей 7 (а, в) и 11 (б, г), в 2015 и 2100 гг.
Fig. 6. Retrospective (ERA5 2015), and prognostic (SSP 2.6 2100 and SSP 8.5 2100) estimates of intra-annual dynamics of heat flux through the bottom and SSO thickness for lakes located at the centroids of regions 7 (а, в) and 11 (б, г) in 2015 and 2100

Дело в том, что водная масса любого водоема, включая озера, является естественным теплоизолятором между атмосферой и донными отложениями. К тому же такой теплоизолятор обладает еще и аномально высокой теплоемкостью. Потепление атмосферы приведет к некоторому увеличению в первую очередь поверхностной температуры в озерах, что, скорее всего, увеличит вертикальную плотностную стратификацию в них, тем самым усиливая изоляцию придонных слоев от проникновения в них атмосферного тепла. Абсолютные значения потока тепла через границу раздела вода-дно крайне невелики – менее 8 Вт/м² (рис. 6), к тому же в течение года он может быть разнонаправленным, т. е. суммарный поток тепла, направленный в ДО, будет еще меньше. Тем не менее этого оказывается достаточно для образования ССО донных отложений. По данным моделирования, толщина ССО в озерах региона 7 может достигать 0,14 м, для озера региона 11 – 0,05 м. При этом потепление климата приведет к смещению максимума оттаивания ДО в более ранний период.

Разумно предположить, что ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию. Кроме того, важно помнить, что теоретические аспекты воздействия изменений климата на окружающую среду, и водные системы в частности, находятся в стадии интенсивного развития. Весьма вероятно, что в скором времени будут разработаны новые сценарии эмиссии парниковых газов и климатические модели. Поэтому нужно быть готовым к уточнению прогностических оценок воздействия будущих изменений климата на водные системы.

Ретроспективные и прогностические расчеты гидротермодинамических характеристик неизученных водных объектов на основе модели FLake могут выполняться без дополнительной ее верификации, так как модель априори применима для использования на территории России. Для расширения возможностей предложенной методики в область решения задач оценки химико-биологических параметров озерной экосистемы требуется привлечение соответствующей экосистемной модели. Примером такой модели может служить FLakeEco [Тержевик и др., 2010], позволяющая выполнять расчеты содержания кислорода в воде, биомассы и первичной продукции фитопланктона. Однако использование такой модели требует проведения верификации по данным натурных наблюдений с целью определения ее химико-биологических параметров, что затруднительно в отдаленных северных регионах.

Заключение

Представленные результаты имитационного и прогностического моделирования подтверждают широкий спектр возможностей модели FLake при решении задач количественной оценки и прогноза изменений ТГД-процессов в малых и средних по площади озерах, расположенных в различных физико-географических и климатических условиях при недостатке или отсутствии данных натурных наблюдений. Таким образом реализуется одно из основных предназначений моделирования – выход за рамки возможного натурального эксперимента. Проведена адаптация разработанной ранее в ИНОЗ РАН методики дистанционной оценки характеристик неизученных и малоизученных озера северных территорий к потребностям задач ретроспективной и прогностической оценки изменений ТГД-параметров водной толщи и донных отложений. Термогидродинамический режим большинства озера определяется прежде всего климатическим воздействием и формой озерной котловины. В изложенной методике климатическое воздействие учитывается за счет использования данных метеорологического реанализа при ретроспективной оценке характеристик озера и разных прогностических сценариев изменения метеорологических параметров, соответствующих различным сценариям выброса парниковых газов в атмосферу в будущем. Влияние формы котловины на гидротермодинамику озера реализуется через учет соотношений между морфометрическими параметрами водоема, характерных для рассматриваемого озерного региона.

Без сомнения, в ближайшей перспективе будут активно развиваться различные направления исследований, связанных с климатическими прогнозами. Будут созданы более совершенные модели общей циркуляции атмосферы и океана. Изменения региональной социально-экономической ситуации найдут свое отражение в уточненных сценариях поступления в атмосферу парниковых газов. При этом можно заметить, что прогресс всех перечисленных выше направлений научных исследований не затронет общую концепцию методики дистанционной оценки характеристик неизученных и малоизученных озера нашей страны и приведет к существенному уточнению расчетных оценок. Хочется также надеяться на развитие системы мониторинга водных объектов, в рамках которой будет собран материал для апробации в различных озерных регионах и более широкого использования моделей химико-биологических процессов в озерах (например, FLakeEco),

что позволит дополнить таким образом методику, изложенную в настоящей работе.

Литература

- Зверев И. С., Расулова А. М., Голосов С. Д., Кондратьев С. А. Дистанционная оценка характеристик неизученных озер северных территорий // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93, № 5. С. 456–461. doi: 10.31857/S0869587323050110
- Измайлова А. В. Водные ресурсы озер России // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14.
- Измайлова А. В. Озера России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал. СПб.: Папирус, 2018. 288 с.
- Кондратьев С. А., Бовыкин И. В. Влияние возможных климатических изменений на гидрологический режим системы водосбор – озеро // Метеорология и гидрология. 2003. № 10. С. 86–96.
- Косиков А. Г., Голубева Е. И., Селиверстов Ю. Г., Семин В. Н., Ушакова Л. А., Харьковец Е. Г. Цифровая модель Арктики и экологические исследования // Проблемы региональной экологии. 2019. № 5. С. 46–52.
- Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология / Гл. ред. А. В. Бородко, гл. ред. тома В. М. Котляков. М.: Картография, 2007. 496 с.
- Полищук Ю. М., Куприянов М. А., Полищук В. Ю., Попков Ю. С. Использование геоимитационного моделирования для прогноза изменения площадей озер Арктики // Информационные технологии и вычислительные системы. 2024. № 3. С. 95–106. doi: 10.14357/20718632240309
- Реки и озера мира: энциклопедия / Институт водных проблем РАН, Институт озероведения РАН, Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова; гл. ред. В. И. Данилов-Данильян. М.: Издательство «Энциклопедия», 2012. 928 с.
- Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера азиатской части России // СПб.: Свое издательство, 2017. 480 с.
- Рянжин С. В., Ульянова Т. Ю. Геоинформационная система «Озера мира» – GIS WORLDLAKE // Доклады Академии наук. 2000. Т. 370, № 4. С. 542–545.
- Семенов С. М., Гладильщикова А. А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 75–106. doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-75-106
- Терзhevik А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.
- Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environ. Model. Softw. 2010. Vol. 25, no. 6. P. 793–801. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.01.002
- IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, NY: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896
- Kirillin G., Nützmam G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environ. Model. Softw. 2011. Vol. 26, no. 5. P. 683–684.
- Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Rasulova A. M., Krylova V. Y., Revunova A. V. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. No. 6. P. 1380–1398. doi: 10.31951/2658-3518-2024-a-6-1380
- Messenger M., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // Nat. Commun. 2016. Vol. 7(1). Art. 13603. doi: 10.1038/ncomms13603
- Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal Environ. Res. 2010. Vol. 15. P. 218–230.
- Mironov D. V. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model // COSMO Technical Report. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008. 44 p.
- Obu J., Westermann S., Bartsch A. et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 193. P. 299–316. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023
- Zdorovennov R., Golosov S., Zverev I., Zdorovennova G., Fedorova I. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes // E3S Web of Conferences (IV Vinogradov Conference). 2020. Vol. 163. Art. 04008. doi: 10.1051/e3sconf/202016304008
- Zverev I. S., Golosov S. D., Kondratyev S. A., Rasulova A. M. Procedure for remote assessment of the characteristics of unexplored lakes in the continental part of the Russian tundra // Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 511, no. 2. P. 726–731. doi: 10.1134/s1028334x23600779

References

- Borodko A. V., Kotlyakov V. M. (eds.). National atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology. Moscow: Kartografiya; 2007. 496 p. (In Russ.)
- Danilov-Danil'yan V. I. (ed.). Rivers and lakes of the world: an encyclopaedia. Moscow: Izdatel'stvo "Encyclopedia"; 2012. 928 p. (In Russ.)
- Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments. Environ. Model. Softw. 2010;25(6):793–801. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.01.002
- IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, NY: Cambridge University Press; 2021. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896
- Izmailova A. V. Lakes of Russia. Distribution patterns, resource potential. St. Petersburg: Papirus; 2018. 288 p. (In Russ.)
- Izmailova A. V. Water resources of the lakes of Russia. Geografiya i prirodnye resursy = Geography and

Natural Resources. 2016;37:281–289. (In Russ.). doi: 10.1134/S1875372816040016

Kirillin G., Nützmann G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environ. Model. Softw.* 2011;26(5):683–684.

Kondrat'ev S. A., Bovykin I. V. Influence of possible climate changes on hydrological regime of a catchment-lake system. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2003;10:57–64.

Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Rasulova A. M., Krylova V. Y., Revunova A. V. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia). *Limnology and Freshwater Biology*. 2024;6:1380–1398. doi: 10.31951/2658-3518-2024-a-6-1380

Kosikov A. G., Golubeva E. I., Seliverstov Yu. G., Semmin V. N., Ushakova L. A., Khar'kovets E. G. Digital model of the Arctic and environmental research. *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*. 2019;5:46–52. (In Russ.)

Messenger M., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nat. Commun.* 2016;7(1):13603. doi: 10.1038/ncomms13603

Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ. Res.* 2010;15:218–230.

Mironov D. V. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model. *COSMO Technical Report*. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service; 2008. 44 p.

Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*. 2019;193:299–316. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023

Polishchuk Yu. M., Kupriyanov M. A., Polishchuk V. Yu., Popkov Yu. S. Using geo-simulation modeling to predict changes in the Arctic lake areas. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Journal of Information Technologies and Computation Systems*. 2024;3:95–106. (In Russ.). doi: 10.14357/20718632240309

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. Lakes of the Asian part of Russia. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2017. 480 p. (In Russ.)

Ryanzhin S. V., Ul'yanova T. Yu. The World Lakes geoinformation system (GIS WORDLAKE). *Doklady Earth Sciences*. 2000;370:214–216.

Semenov S. M., Gladil'shchikova A. A. Scenarios of anthropogenic changes in the climate system in the 21st century. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2022;8(1):75–106. (In Russ.). doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-75-106

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Potakhin M. S., Shipunova E. A., Zverev I. S. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake. *Water Resources*. 2010;37(5):662–673. doi: 10.1134/S0097807810050064

Zdorovenov R., Golosov S., Zverev I., Zdorovenova G., Fedorova I. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes. *E3S Web of Conferences (IV Vinogradov Conference)*. 2020;163:04008. doi: 10.1051/e3sconf/202016304008

Zverev I. S., Golosov S. D., Kondratiev S. A., Rasulova A. M. Procedure for remote assessment of the characteristics of unexplored lakes in the continental part of the Russian tundra. *Doklady Earth Sciences*. 2023;511(2):726–731. doi: 10.1134/s1028334x23600779

Zverev I. S., Rasulova A. M., Golosov S. D., Kondrat'ev S. A. Remote sensing characterisation of unstudied lakes in the northern territories. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023;93(5):456–461. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869587323050110

Поступила в редакцию / received: 13.02.2025; принята к публикации / accepted: 21.02.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кондратьев Сергей Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник

e-mail: 3718470@gmail.com; kondratyev@limno.org.ru

Голосов Сергей Дмитриевич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Зверев Илья Сергеевич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

e-mail: iliazverev@mail.ru

Расулова Анна Мурадовна

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник

e-mail: arasulova@limno.ru

CONTRIBUTORS:

Kondratyev, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher

Golosov, Sergey

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Zverev, Ilya

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Rasulova, Anna

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher

УДК 504.455 : 57.04

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОЗЕРНЫХ ВОД УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ В АРКТИКЕ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР ГОРОДА МУРМАНСКА)

М. А. Постевая^{1,2*}, В. А. Даувальтер¹, З. И. Слуковский¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (Академгородок, 14а, Апатиты, Россия, 184209), *Postevaya.ma@yandex.ru

² Мурманский арктический университет (ул. Капитана Егорова, 15, Мурманск, Россия, 183038)

Представлены результаты анализа закономерностей формирования химического состава озерных вод в условиях городской среды. Объектами исследования послужили восемь озер г. Мурманска, в различной степени подверженных антропогенному воздействию. Установлено, что химический состав вод исследованных озер определяется комплексным воздействием природных и антропогенных факторов. На основе результатов факторного анализа методом главных компонент установлено четыре значимых фактора: 1) региональные особенности района исследования (геологическое строение водосборных территорий, влияние морских аэрозолей); 2) поступление аллохтонного органического вещества из почвенного покрова; 3) процесс эвтрофикации озер, а также окислительно-восстановительные условия внутри водоемов; 4) антропогенная нагрузка на водоемы и их водосборы (сжигание мазутного топлива, деятельность автомобильного транспорта, разрушение инфраструктуры). При проведении корреляционного анализа выявлены закономерные зависимости величин pH, минерализации, кислотнейтрализующей способности вод от содержания главных ионов, а также щелочных и щелочноземельных металлов в исследованных озерах. Установлена связь между косвенными показателями содержания органического вещества (ТОС, цветность, гумусность) и концентрациями типоморфных (Fe, Al) и редкоземельных элементов (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd).

Ключевые слова: малые озера; гидрохимия; факторный анализ; корреляционный анализ; урбанизация; Арктика

Для цитирования: Постевая М. А., Даувальтер В. А., Слуковский З. И. Закономерности формирования химического состава озерных вод урбанизированной среды в Арктике (на примере озер города Мурманска) // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 33–50. doi: 10.17076/lim1936

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы государственного задания ИППЭС КНЦ РАН № FMEZ-2024-0014.

M. A. Postevaya^{1,2*}, V. A. Dauvalter¹, Z. I. Slukovskii¹. FORMATION PATTERNS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE WATER IN AN URBANIZED ENVIRONMENT IN THE ARCTIC (MURMANSK LAKES CASE STUDY)

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Russia), *Postevaya.ma@yandex.ru

² Murmansk Arctic University (15 Kapitan Egorov St., 183038 Murmansk, Russia)

The paper presents the results of an analysis of the formation patterns of the chemical composition of lake water in an urban environment. The objects of the study were eight lakes of Murmansk, which are exposed to human impact of varying degree. It established that the chemical composition of water in the studied lakes is shaped by a combination of natural and anthropogenic factors. Factor analysis by the principal components method revealed four significant factors: 1) regional features of the study area (geological structure of catchment areas, influence of marine aerosols); 2) inflow of allochthonous organic matter from the land cover; 3) eutrophication of lakes, as well as redox conditions inside the lakes; 4) human pressure on the lakes and their catchments (combustion of fuel oil, motor transport, degradation of infrastructure). Correlation analysis showed that the water pH, total dissolved solids, and acid neutralizing capacity depended in a regular manner on the content of major ions and alkaline and alkaline-earth metals in the studied lakes. A relationship was detected between indirect indicators of organic matter content (TOC, chromaticity, humus) and concentrations of typomorphic (Fe, Al) and rare-earth elements (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd).

Keywords: small lakes; hydrochemistry; factor analysis; correlation analysis; urbanization; Arctic

For citation: Postevaya M. A., Dauvalter V. A., Slukovskii Z. I. Formation patterns of the chemical composition of lake water in an urbanized environment in the Arctic (Murmansk lakes case study). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 33–50. doi: 10.17076/lim1936

Funding. The research was carried out within state assignment No. FMEZ-2024-0014 to the Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences.

Введение

Формирование химического состава озерных вод обуславливается совокупностью физических, химических и биологических процессов, протекающих в водоеме и на его водосборе [Osadchyy et al., 2016]. Состав природных вод формируется под влиянием таких физико-географических условий, как рельеф, климат, процессы выветривания горных пород, состав и структура почвенного покрова и др. Помимо этого, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия внутри водоема определяют растворимость минералов и скорость миграции элементов, а также форму их нахождения в природных водах [Даувальтер, Кашулин, 2014; Osadchyy et al., 2016]. При определенных условиях среды донные отложения могут как выступать источником вторичного поступления биогенных элементов и тяжелых металлов в водную среду, так и снижать их токсическое воздействие посредством образования устойчивых комплексных соединений с гумусовыми кислотами, входящими в состав донных отложений [Algül, Beyhan, 2020].

Урбанизированные ландшафты обуславливают специфические особенности формирования озерных вод, в значительной степени отличающиеся от естественных условий. Данные территории испытывают высокое антропогенное и техногенное воздействие со стороны транспорта, промышленных предприятий, жилищно-коммунального хозяйства и т. д. [Саэт и др., 1990]. При этом городские застройки, асфальтированные и другие водонепроницаемые покрытия способствуют «запечатыванию» почвенного покрова. В таких экранированных («запечатанных») почвах происходит нарушение водного и теплового баланса, снижение биологической продуктивности, а также способности к самоочищению почв [Кошелева, 2019]. Как следствие, увеличивается доля поверхностного стока с повышенным уровнем загрязняющих веществ в водные объекты [Черногаева и др., 2019]. В дальнейшем это может привести к трансформации природных вод, а именно к эвтрофикации, антропогенному закислению или защелачиванию и обогащению токсичными микроэлементами водных экосистем [Никаноров, 2001].

Характерной особенностью северных широт является избыточное увлажнение территорий, низкие температуры, маломощный почвенный покров и, как следствие, замедленные процессы химического выветривания элементов, а также минерализации органического вещества. В результате в условиях Арктики формируются ультрапресные и олиготрофные воды, чутко реагирующие на все изменения, происходящие на их водосборах [Moiseenko, 2018]. Гумидный тип климата обуславливает низкое содержание основных катионов в почвенном покрове и вместе с тем особую чувствительность пресноводных экосистем к кислотному воздействию [Моисеенко и др., 2015]. Смещение pH природных вод в сторону кислых значений способствует увеличению растворимости, миграционной способности и токсичности тяжелых металлов, содержащихся в воде [Skjelkvåle et al., 2007; Yevtushenko et al., 2021]. Биота северных регионов характеризуется низким видовым разнообразием, уязвимость ее от кислотного и токсического воздействия возрастает после полярной ночи [Skjelkvåle et al., 2007]. Как уже отмечалось, для северных широт характерен олиготрофный тип озер. Однако увеличение содержания питательных веществ, вызванное глобальным потеплением климата

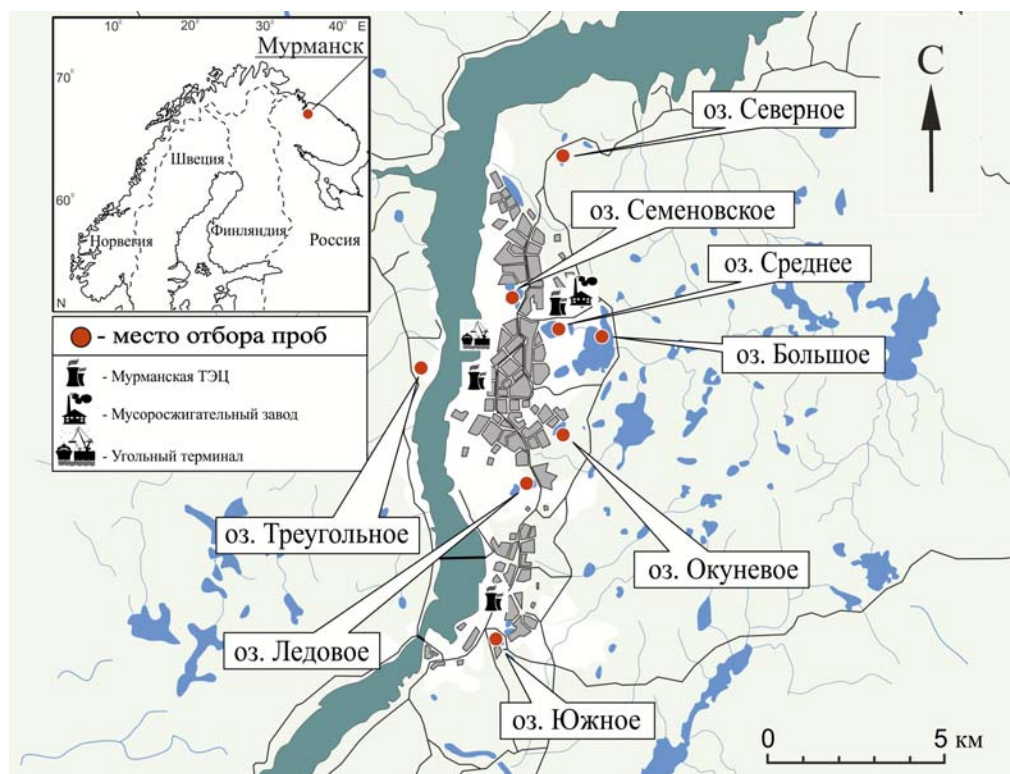
или антропогенной деятельностью, способствует цветению воды и гибели рыб даже в арктических регионах [Ayala-Borda et al., 2021; Kashulin et al., 2021; Moiseenko et al., 2022].

Таким образом, проблема определения закономерностей формирования поверхностных вод, в особенности в условиях городской среды арктических регионов, на сегодня остается актуальной. В настоящее время при изучении влияния природных и антропогенных факторов на химический состав озерных вод широкое применение получили методы математической статистики, в том числе и факторный анализ [Gradilla-Hernández et al., 2020; Khan et al., 2022; Li et al., 2023].

Цель работы – выявление основных факторов, определяющих химический состав озерных вод г. Мурманска, а также установление взаимосвязей в содержании макро- и микроэлементов при помощи методов статистического анализа.

Материалы и методы

Объектами исследования послужили восемь озер г. Мурманска, в различной степени подверженные антропогенному воздействию [Слуковский и др., 2023] (рис.).



Карта-схема расположения объектов исследования
Schematic map of the studied objects

Морфометрические показатели

Озеро Большое обладает наибольшими значениями площади водного зеркала и водосборного бассейна из всех исследуемых озер (табл. 1). Наименьшим по площади, глубине и размерам водосборного бассейна является оз. Северное. Самое глубоководное – оз. Среднее; на втором месте по данному показателю стоит оз. Ледовое с максимальной глубиной 15,7 м. Коэффициент открытости варьировал в пределах от 0,005 до 0,088, что характеризует котловины всех исследуемых озер как слабо открытые, с низкой степенью ветрового перемешивания водных масс [Лопух, Якушко, 2011]. Большинство озер имеют параболическую форму котловины. Исключение составляют озера Семеновское и Южное, для которых характерна коническая форма, а также оз. Треугольное с полуэллипсоидной котловиной.

Основные морфологические показатели, такие как площадь водного зеркала, площадь водосборного бассейна, длина озера, длина береговой линии, максимальная и средняя глубина, а также объем водной массы исследуемых озер, были взяты из монографии [Слуковский и др., 2023]. Батиметрические исследования проводились при помощи эхолота-картплотте-

ра Garmin Echomap Plus 42св. В свою очередь, параметры, характеризующие подводную (коэффициенты емкости, открытости, глубинности) и надводную (коэффициенты удлиненности, изрезанности) форму котловин, а также значения средней ширины озера и показатель удельного водосбора определялись расчетным методом в соответствии с работами С. В. Григорьева, П. С. Лопуха и О. Ф. Якушко. Средняя ширина озера (B_{cp}) определена как частное от деления площади водного зеркала на длину озера: $B_{cp} = \frac{F}{L}$. Коэффициент изрезанности береговой линии (M) определен как отношение длины береговой линии (l) к длине окружности круга, площадь которого равна площади исследуемого водоема: $M = \frac{l}{2\sqrt{F\pi}}$. Коэффициент удлиненности озера ($K_{уд}$) определен как отношение длины озера (L) к средней ширине (B_{cp}): $K_{уд} = \frac{L}{B_{cp}}$. Коэффициент глубинности ($K_{гн}$) определен как отношение средней глубины озера ($H_{сред}$) к его площади водного зеркала (F) по следующей формуле: $K_{гн} = \frac{H_{сред}}{\sqrt[3]{F}}$. Коэффициент открытости ($K_{откр}$) определен как отношение площади озера (F) к средней глубине котловины ($H_{сред}$): $K_{откр} = \frac{F}{H_{сред}}$. Коэффициент емкости озерной котловины (C) установлен как отношение средней глубины озера ($H_{сред}$) к максимальной глубине ($H_{макс}$): $C = \frac{H_{сред}}{H_{макс}}$. Показатель

Таблица 1. Морфометрические характеристики исследованных озер г. Мурманска

Table 1. Morphometric description of the studied lakes in Murmansk

Озеро Lake	Морфометрические параметры Morphometric parameters								Коэффициенты Coefficients					
	$F^*, \text{км}^2$ km^2	$F_{бас}^*, \text{км}^2$ km^2	$L^*, \text{км}$ km	$B_{cp}^*, \text{км}$ km	$l^*, \text{км}$ km	$H_{макс}^*, \text{м}$ m	$H_{сред}^*, \text{м}$ m	$V^*, \text{км}^3$ km^3	M	$K_{уд}$	$K_{гн}$	$K_{откр}$	C	ΔF
Северное Severnoye	0,009	0,117	0,23	0,04	0,52	3,90	1,75	0,00016	1,55	5,75	8,41	0,005	0,45	13,00
Семеновское Semyonovskoye	0,213	1,303	0,75	0,28	3,2	11,30	2,40	0,00051	1,96	2,68	4,02	0,088	0,21	6,15
Среднее Srednee	0,248	1,014	0,70	0,35	1,99	23,50	7,70	0,00191	1,20	2	12,3	0,032	0,33	4,09
Большое Bolshoye	1,320	19,170	2,5	0,53	-	-	-	-	-	4,75	-	-	-	14,52
Окуневое Okunevoye	0,048	2,010	0,55	0,09	1,27	5,60	2,30	0,00011	1,63	6,1	6,33	0,021	0,41	41,87
Ледовое Ledovoye	0,040	3,456	0,27	0,15	0,78	15,70	7,80	0,00031	1,10	1,8	22,8	0,005	0,50	86,40
Треугольное Treugolnoye	0,100	0,397	0,16	0,62	0,55	8,60	5,60	0,00056	0,49	0,26	12,1	0,018	0,65	3,97
Южное Yuzhnoye	0,053	0,808	0,43	0,12	1,13	11,30	3,05	0,00016	1,38	3,58	8,12	0,017	0,27	15,24

Примечание. F – площадь озера; $F_{бас}$ – площадь водосборного бассейна; L – длина озера; B_{cp} – средняя ширина озера; l – длина береговой линии; $H_{макс}$ – максимальная глубина; $H_{сред}$ – средняя глубина; V – объем водной массы; M – коэффициент изрезанности береговой линии; $K_{уд}$ – коэффициент удлиненности; $K_{гн}$ – коэффициент глубинности; $K_{откр}$ – коэффициент открытости; C – коэффициент емкости; ΔF – показатель удельного водосбора; * данные по: Слуковский и др., 2023.

Note. F – lake area; $F_{бас}$ – catchment area; L – lake length; B_{cp} – average lake width; l – coastline length; $H_{макс}$ – maximum depth; $H_{сред}$ – average depth; V – water mass volume; M – coefficient of coastline irregularity; $K_{уд}$ – elongation coefficient; $K_{гн}$ – depth coefficient; $K_{откр}$ – exposure coefficient; C – capacity coefficient; ΔF – coefficient of specific catchment; * data after: Slukovskii et al., 2023.

удельного водосбора (ΔF) определен как отношение площади озера (F) к площади водосборного бассейна ($F_{\text{бас}}$): $\Delta F = \frac{F}{F_{\text{бас}}}$ [Григорьев, 1959; Лопух, Якушко, 2011].

Отбор и анализ проб

Отбор проб воды осуществлялся в период с 2018 по 2022 г. при помощи батометра из поверхностного (1 м от поверхности) и придонного (1 м от дна) горизонтов. Отобранная вода переливалась в полиэтиленовые бутылки, которые дважды ополаскивали озерной водой. Пробы воды помещали в темные контейнеры и в короткие сроки транспортировали в лабораторию при температуре +5 °С.

Аналитические исследования проводили в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН по единым стандартным методикам [Clesceri et al., 1999; Моисеенко и др., 2002]. Показатель pH определялся методом потенциометрии на pH-метре фирмы Metrohm. Определение концентраций Na^+ , K^+ (модель Perkin-Elmer 460, воздушно-ацетиленовое пламя) и Ca^{2+} , Mg^{2+} (модель Perkin-Elmer 460, закись азота-ацетиленовое пламя) осуществлялось методом пламенной атомно-эмиссионной спектроскопии. Концентрации SO_4^{2-} и Cl^- определялись на жидкостном хроматографе Millipore, модель Waters 430. Концентрации гидрокарбонатов определялись методом титрования Грана. Также определялось содержание органического материала методом окисления Mn, концентраций форм Si, N и P, а также показатель цветности озерных вод (колориметрическим методом).

Общий органический углерод (TOC) оценивался по перманганатной окисляемости (COD_{Mn}): $\text{TOC} = 0,764 \cdot \text{COD}_{\text{Mn}} + 1,55$ [Henriksen, 1992]. Расчетное значение гумусности воды (Hum) определялось как среднее геометрическое значение показателей Color и COD_{Mn} : $\text{Hum} = \sqrt{\text{Color} \times \text{COD}_{\text{Mn}}}$ [Лозовик, 2006]. Содержание органического аниона ($A_{\text{орг}}^-$) рассчитывалось на основе содержания органического вещества: $A_{\text{орг}}^- = \text{TOC} \cdot (4,7 - 6,87 \cdot \exp(-0,332 \cdot \text{TOC}))$ [Oliver et al., 1983]. Кислотонейтрализующая способность вод (ANC) исследуемых озер (мкг-экв/л) рассчитывалась без поправки на морские аэрозоли по следующей формуле: $\text{ANC} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{NH}_4^+] - [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{NO}_3^-] - [\text{Cl}^-]$ [Skjelkvåle et al., 2006]. Содержание микроэлементов (Al, Fe, Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Mo, Ba, La, Pr, Nd, Sm, Gd, U, Mn) в пробах воды измеряли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой ЭЛАН 9000.

Статистическая обработка данных

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программ Microsoft Excel 2019 и Statistica 10. Для выявления связи между концентрациями макро- и микроэлементов и факторов, определяющих химический состав вод исследованных озер, был проведен корреляционный (коэффициент корреляции Пирсона) и факторный (метод главных компонент) анализ. Поскольку распределение концентраций гидрохимических показателей отличалось от нормального, с целью выполнения статистических требований используемых методов к исходным данным было применено Бокс-Кокс преобразование [Box, Cox, 1964; Поронов, 2011]. Для статистического анализа использованы данные по содержанию макро- и микроэлементов в составе озерных вод, а также таких показателей, как pH, минерализация (TDS), цветность, гумусность, кислотонейтрализующая способность вод (ANC) и др. Для проведения факторного анализа дополнительно использованы некоторые морфометрические параметры озер: площадь водного зеркала, площадь водосборного бассейна, показатель удельного водосбора (ΔF), коэффициенты глубинности ($K_{\text{г}}$) и открытости ($K_{\text{откр}}$). При выполнении факторного анализа количество главных компонент определялось при помощи критериев Кайзера (критерий собственных чисел) и Кеттела (критерий «каменистой осыпи») [Ким, 1989]. Результаты исследования визуализировали в Inkscape 0.48.4 (Free Software Foundation, США) и Corel Draw Graphics Suite 2019 (Corel Corporation, Канада).

Результаты и обсуждение

Химический состав вод озер г. Мурманска

В соответствии с [Никаноров, 2001], за период с 2018 по 2022 г. воды в исследованных озерах по медианным значениям pH относятся к слабокислым (оз. Треугольное), нейтральным (озера Северное, Окуновое, Семеновское, Среднее, Ледовое) и слабощелочным (оз. Южное). Воды оз. Большое по значению pH находятся в пограничном положении между слабокислыми и нейтральными. По степени минерализации (TDS) исследуемые озера подразделяются на маломинерализованные (Окуновое, Семеновское, Среднее, Большое и Треугольное) с общей минерализацией в диапазоне от 19,4 до 140,7 мг/л, среднеминерализованные (Южное, Северное) с минерализацией от 377,4 до 381,0 мг/л,

а в оз. Ледовое выявлена повышенная минерализация – 584 мг/л (табл. 2).

Мурманск расположен на берегу Кольского залива Баренцева моря, что в значительной степени определяет формирование катионно-анионного состава исследуемых озер. Согласно классификации Алекина [1970] воды озер Северное, Семеновское, Большое и Ледовое относятся к хлоридному классу и натриевой

группе, Окуновое – к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе (типичное распределение главных ионов для озер Мурманской области), Треугольное и Южное – к смешанному гидрокарбонатно-хлоридному классу и натриевой группе, а Среднее – к смешанному гидрокарбонатно-хлоридному классу и кальциевой группе.

Превышение концентраций общего азота и фосфора над условно-фоновыми значениями

Таблица 2. Химический состав вод исследованных озер за период с 2018 по 2022 г. (в числителе представлены медианные концентрации, в знаменателе – минимальные и максимальные)

Table 2. Chemical composition of water in the studied lakes from 2018 to 2022 (the median concentrations are given in the numerator, and the minimum and maximum values – in the denominator)

Показатели Indicator	Северное Severnoye	Семеновское Semyonovskoye	Среднее Srednee	Большое Bolshoye	Окуновое Okunevoye	Ледовое Ledovoye	Треугольное Treugolnoye	Южное Yuzhnoye	Bazova, 2017
pH	$\frac{6,95}{6,37-7,04}$	$\frac{6,66}{6,32-7,05}$	$\frac{7,26}{6,84-7,52}$	$\frac{6,48}{6,45-6,49}$	$\frac{6,93}{6,60-6,99}$	$\frac{7,3}{6,97-9,34}$	$\frac{6,19}{6,09-6,5}$	$\frac{8,02}{7,78-9,11}$	$\frac{6,15}{5,66-6,41}$
Ca ²⁺ , мг/л mg/l	$\frac{27,3}{20,3-32,3}$	$\frac{7,6}{3,1-10,1}$	$\frac{17,7}{16,3-19,6}$	$\frac{3,2}{3,0-3,2}$	$\frac{8,6}{8,3-10,9}$	$\frac{58,6}{36,6-77,4}$	$\frac{2,0}{1,8-2,4}$	$\frac{41,3}{9,2-43,3}$	$\frac{1,1}{0,4-2,1}$
Mg ²⁺ , мг/л mg/l	$\frac{6,7}{4,9-8,0}$	$\frac{2,0}{0,7-2,3}$	$\frac{3,8}{3,6-4,1}$	$\frac{1,2}{1,2-1,2}$	$\frac{2,1}{1,9-2,5}$	$\frac{10}{7,6-13,3}$	$\frac{0,9}{0,7-1,0}$	$\frac{10,0}{5,8-10,9}$	$\frac{0,7}{0,4-0,9}$
Na ⁺ , мг/л mg/l	$\frac{99,4}{74,1-111}$	$\frac{11,1}{4,5-12,6}$	$\frac{17,6}{17,0-18,9}$	$\frac{9,8}{9,8-9,9}$	$\frac{6,1}{5,3-7,4}$	$\frac{112}{97,1-134}$	$\frac{3,2}{3,0-3,2}$	$\frac{56,7}{27,4-61,4}$	$\frac{3,1}{0,8-4,5}$
K ⁺ , мг/л mg/l	$\frac{4,1}{3,3-4,6}$	$\frac{1,9}{0,8-2,9}$	$\frac{3,7}{3,6-4,1}$	$\frac{0,7}{0,7-0,8}$	$\frac{1,3}{1,3-1,6}$	$\frac{9,3}{7,2-11,3}$	$\frac{0,6}{0,6-0,7}$	$\frac{7,8}{4,5-8,9}$	$\frac{0,4}{0,2-0,5}$
HCO ₃ ⁻ , мг/л mg/l	$\frac{26,2}{22,3-39,0}$	$\frac{19,0}{5,9-33,9}$	$\frac{41,9}{39,2-44,6}$	$\frac{4,2}{4,1-4,3}$	$\frac{19,8}{18,1-22,9}$	$\frac{191}{90-313}$	$\frac{6,0}{4,2-8,7}$	$\frac{153}{43,4-163}$	$\frac{3,5}{0,7-757}$
SO ₄ ²⁻ , мг/л mg/l	$\frac{26,4}{4,1-37,2}$	$\frac{10,5}{5,0-13,1}$	$\frac{30,6}{29,2-33,5}$	$\frac{6,58}{6,40-6,80}$	$\frac{14,2}{13,5-17,0}$	$\frac{35,2}{5,4-55,7}$	$\frac{3,3}{3,1-4,1}$	$\frac{21,3}{11,0-43,9}$	$\frac{1,8}{1-3,6}$
Cl ⁻ , мг/л mg/l	$\frac{185,7}{24,4-211}$	$\frac{19,1}{7,5-23,5}$	$\frac{25,9}{23,5-28,1}$	$\frac{16,4}{16,3-17,30}$	$\frac{8,4}{8,1-9,8}$	$\frac{176,5}{160-211}$	$\frac{3,9}{3,1-4,3}$	$\frac{85,9}{39,1-104}$	$\frac{4,8}{1-7,7}$
TDS, мг/л mg/l	$\frac{381}{275,5-426}$	$\frac{70,8}{27,5-84,7}$	$\frac{140,7}{134-150}$	$\frac{42,3}{42,1-43,0}$	$\frac{60,6}{59,0-72,1}$	$\frac{584}{495-735}$	$\frac{19,4}{18,7-23,5}$	$\frac{377,4}{140-432}$	$\frac{28,0}{13-137}$
TN, мкгN/л µgN/l	$\frac{374}{225-695}$	$\frac{501,5}{40-942}$	$\frac{301}{190-415}$	$\frac{150}{142-169}$	$\frac{289}{220-437}$	$\frac{3550}{964-6640}$	$\frac{295}{204-478}$	$\frac{277}{237-325}$	$\frac{160}{99-366}$
TP _{н/ф} , мкгP/л µgP/l	$\frac{14,0}{9,0-153}$	$\frac{25,5}{12-122}$	$\frac{11,0}{6-16}$	$\frac{8}{6-10}$	$\frac{15}{12-17}$	$\frac{451}{17-1677}$	$\frac{16,5}{11,0-45}$	$\frac{19,0}{10,0-24}$	$\frac{6,0}{4,0-21}$
Al, мкг/л µg/l	$\frac{39,75}{19,54-99,0}$	$\frac{12,85}{7,60-29,0}$	$\frac{19,50}{9,85-41,30}$	$\frac{44,90}{44,50-70,10}$	$\frac{76,0}{54,09-110}$	$\frac{35,7}{19,4-285}$	$\frac{85,78}{68,49-123}$	$\frac{9,60}{2,60-39,60}$	30,56
Fe, мкг/л µg/l	$\frac{182}{95-1921}$	$\frac{159}{28-3339}$	$\frac{37,27}{18,00-41,90}$	$\frac{84,00}{84,00-115}$	$\frac{436}{287,3-525}$	$\frac{1490}{88-6051}$	$\frac{1105}{560-3488}$	$\frac{54,4}{32,00-103}$	47,26
V, мкг/л µg/l	$\frac{2,93}{2,14-19,37}$	$\frac{2,84}{0,92-43,11}$	$\frac{3,07}{1,49-26,94}$	$\frac{3,32}{3,25-4,55}$	$\frac{3,55}{2,93-11,12}$	$\frac{5,70}{1,39-12,91}$	$\frac{2,02}{1,50-4,09}$	$\frac{1,26}{0,75-2,23}$	0,67
Ni, мкг/л µg/l	$\frac{5,57}{3,20-13,18}$	$\frac{4,67}{2,84-10,92}$	$\frac{4,99}{4,54-12,2}$	$\frac{6,93}{5,49-7,01}$	$\frac{5,68}{4,89-7,78}$	$\frac{12,33}{7,19-18,66}$	$\frac{2,48}{1,99-12,03}$	$\frac{3,29}{2,07-8,18}$	1,06
Zn, мкг/л µg/l	$\frac{11,61}{3,51-26,56}$	$\frac{5,28}{0,89-19,00}$	$\frac{2,77}{0,75-15,77}$	$\frac{7,96}{7,83-8,82}$	$\frac{9,70}{6,56-30,12}$	$\frac{8,28}{3,75-17,13}$	$\frac{5,63}{3,38-7,68}$	$\frac{1,81}{1,44-3,22}$	1,66
Rb, мкг/л µg/l	$\frac{6,11}{4,52-6,77}$	$\frac{2,94}{1,11-3,62}$	$\frac{5,13}{4,53-6,94}$	$\frac{1,45}{1,43-1,56}$	$\frac{2,48}{2,22-3,33}$	$\frac{9,21}{7,08-11,44}$	$\frac{1,73}{1,59-1,95}$	$\frac{5,36}{4,54-5,79}$	1,07
Sr, мкг/л µg/l	$\frac{188,9}{107,3-250,3}$	$\frac{68,4}{26,40-80,26}$	$\frac{114,5}{95,6-135,2}$	$\frac{27,67}{26,95-27,78}$	$\frac{68,91}{60,79-81,46}$	$\frac{349}{221-554}$	$\frac{21,19}{19,67-24,75}$	$\frac{226}{177-288}$	7,56
Ba, мкг/л µg/l	$\frac{65,55}{41,55-100,1}$	$\frac{22,03}{15,33-33,96}$	$\frac{19,83}{15,55-24,09}$	$\frac{8,06}{7,92-8,29}$	$\frac{21,14}{18,84-26,50}$	$\frac{75,52}{53,26-118}$	$\frac{10,96}{7,89-13,46}$	$\frac{71,54}{56,95-79,24}$	5,08
Mn, мкг/л µg/l	$\frac{18,88}{5,88-176}$	$\frac{28,64}{1,72-398}$	$\frac{7,51}{1,75-109}$	$\frac{6,64}{5,90-9,70}$	$\frac{8,15}{5,54-16,73}$	$\frac{344,4}{5,85-608,9}$	$\frac{27,25}{10,89-417,6}$	$\frac{10,46}{2,32-73,53}$	2,09

зафиксировано во всех озерах г. Мурманска, за исключением оз. Большое, для которого характерны наименьшие значения биогенных элементов (TN 150 мкгN/л; TP 8 мкгP/л). Максимальные концентрации общего фосфора (451 мкгP/л) и азота (3550 мкгN/л) характерны для вод оз. Ледовое. Содержание органического вещества в исследованных озерах, как правило, меньше, чем средние показатели условно-фоновых озер северо-восточной части Мурманской области. Согласно классификации вод по гумусности, оз. Среднее является ультраолигогумусным, озера Южное и Семеновское относятся к олигогумусным, а озера Ледовое, Окуновое, Северное, Большое и Треугольное – к мезогумусным.

Исследованные озера в значительной степени подвержены антропогенному воздействию со стороны городской среды, что, несомненно, сказывается на микроэлементном составе озерных вод. Наибольшее превышение условного фона в мурманских озерах обнаружено для V, Ni, Cu, Zn, Al, Mn, Fe, Sr, Rb, Ba. Самым загрязненным среди исследованных озер является оз. Ледовое, в котором зафиксированы максимальные концентрации большинства вышеперечисленных микроэлементов. Наименее подвержено антропогенному влиянию оз. Большое, использующееся в качестве одного из источников водоснабжения г. Мурманска. Подробное описание химического состава озер, в частности содержания главных ионов, биогенных элементов и микроэлементов, представлено в работах [Slukovskii et al., 2020; Даувальтер и др., 2021; Postevaya et al., 2021, 2023].

Сопряженное поступление макро- и микроэлементов в воды озер г. Мурманска

Проведенный корреляционный анализ показал высокие положительные коэффициенты корреляции между величиной минерализации (TDS) исследованных вод и содержанием всех главных ионов ($r = 0,90–0,98$ при $p = 0,001$ и $n = 80$), а также щелочных и щелочноземельных металлов, таких как Sr ($r = 0,98$), Li ($r = 0,93$), Rb ($r = 0,93$) и Ba ($r = 0,90$). Коэффициент корреляции между величиной pH и концентрациями щелочных и щелочноземельных металлов был ниже и варьировал от 0,61 до 0,78, между значениями pH и минерализации достигал 0,67.

Между концентрациями основных катионов и анионов в водах озер г. Мурманска выявлена тесная связь, при этом наиболее высокие коэффициенты корреляции наблюдаются между

ионами натрия и хлорид-ионами ($r = 1,00$) – главными компонентами морских аэрозолей [Моисеенко, Дину, 2020].

В свою очередь, данные ионы тесно коррелируют ($r = 0,85–0,93$ при $p = 0,001$) с концентрациями Li, Rb, Sr и Ba, что может указывать на их совместное поступление в водные объекты из морских аэрозолей и реагентов для противогололедной обработки городских дорог [Даувальтер и др., 2021]. Вместе с тем стронций в геохимических и биологических процессах сопряжен с кальцием, а рубидий является сопутствующим элементом калия [Моисеенко и др., 1997]. Высокая корреляция между щелочными и щелочноземельными металлами ($r = 0,83–0,98$) обусловливается схожестью их физико-химических свойств [Базова, 2016]. Так, например, Li и Rb обладают высокой химической активностью и способны мигрировать в городской среде из пород, слагающих водосборные территории, и осаждаться вместе с загрязняющими веществами [Слуковский, Светов, 2016].

Кислотонейтрализующая способность вод тесно коррелирует с показателями pH ($r = 0,74$) и минерализации ($r = 0,76$). В работе [Bazova, 2017] ранее отмечалось, что способность поверхностных вод противостоять закислению в условиях Кольского Севера обусловлена природным насыщением вод обменными основаниями (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) и поступлением на водосборные территории кислотообразующих соединений. Под воздействием сильных кислот снижается насыщение почв обменными основаниями, и, как следствие, их миграция в поверхностные воды становится ниже [Моисеенко, Дину, 2015]. В исследованных озерах г. Мурманска установлена положительная зависимость между показателем ANC и концентрациями Ca ($r = 0,83$), Mg ($r = 0,81$), K ($r = 0,87$), Na ($r = 0,66$). Коэффициент корреляции между кислотонейтрализующей способностью и содержанием сульфатов ($r = 0,56$) и хлоридов ($r = 0,62$) несколько ниже. Однако наибольшие коэффициенты корреляции величины ANC установлены с концентрациями гидрокарбонат-ионов ($r = 0,95$), а также с содержанием таких щелочных и щелочноземельных металлов, как Li ($r = 0,90$), Rb ($r = 0,89$), Sr ($r = 0,94$) и Ba ($r = 0,86$).

Общий органический углерод (TOC), показатели цветности и гумусности тесно коррелируют между собой, а также с содержанием органического аниона (A^-), Si, Fe, Al и редкоземельных элементов (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd). При этом отмечаются более высокие значения коэффициентов корреляции A^- с TOC (1,00)

и показателем гумусности ($r = 0,95$) по сравнению с цветностью ($r = 0,87$) озерных вод. В свою очередь, более тесная связь показателя цветности отмечается с концентрациями Fe ($r = 0,72$) и Al ($r = 0,66$). В ряде исследований установлено, что растворенное органическое вещество и Fe, входящие в состав природных вод бореальной зоны, являются основными факторами, определяющими цветность воды [Aschan, 1908; Kritzberg, Ekström, 2012; Xiao et al., 2015; Xiao, Riise, 2021]. В исследованных озерах г. Мурманска ТОС и Fe коррелируют с показателем цветности воды. Коэффициенты корреляции между цветностью и ТОС, а также цветностью и Fe составили 0,87 и 0,72 соответственно.

Несмотря на то что Fe^{3+} обладает низкой растворимостью в озерах со значением pH воды выше 3,5, оно способно образовывать комплексные соединения с растворенным органическим веществом при околонейтральных значениях pH [Shapiro, 1964; Neubauer et al., 2013; Лозовик и др., 2017; Дину, Баранов, 2022].

В то же время величина pH достоверно отрицательно коррелирует с показателем цветности и концентрациями Fe. Увеличение цветности озерных вод и уровня содержания Fe, вероятно образующего комплексные соединения с гумусовыми кислотами, приводит к снижению pH среды в сторону кислых значений [Moiseenko et al., 2020]. Однако данная зависимость имеет слабый характер, коэффициенты корреляции составляют $-0,42$ для Fe и $-0,37$ для цветности. Достоверной зависимости между pH и содержанием органического аниона в исследуемых озерах не выявлено.

Установлена слабая отрицательная корреляционная зависимость концентраций La, Pr, Nd, Sm, Gd ($r = 0,41$ – $0,46$) от условий pH среды. Снижение значений величины pH приводит к увеличению содержания редкоземельных элементов в водоемах и водотоках [Sholkovitz, 1995; Gomes et al., 2022]. Слабый характер выявленной зависимости обуславливается тем, что на процесс поступления и накопления редкоземельных элементов в результате водной миграции также оказывает влияние значение Eh воды, ее химический состав, присутствие взвесей (коллоидов), процессы сорбции, десорбции и биоаккумуляции и др. [Казак и др., 2021].

С увеличением концентрации общего фосфора возрастает содержание общего азота ($r = 0,76$), ионов аммония и кремния ($r = 0,46$), что обусловлено процессами продукции и деструкции органического вещества в водных экосистемах.

Средняя положительная корреляционная связь установлена для следующих групп соединений: V–Ni ($r = 0,56$), V–Zn ($r = 0,63$), Ni–Cr ($r = 0,53$), Ni–Co ($r = 0,60$), Ni–Zn ($r = 0,54$). Данная зависимость может быть обусловлена как геологическим, так и антропогенными источниками поступления. Так, никель является главным сидерофильным элементом Балтийского кристаллического щита и в природных условиях геологически сопряжен с Co [Моисеенко и др., 1997; Янин и др., 2016]. В то же время Ni и V являются элементами – индикаторами сжигания мазута, используемого в г. Мурманске в качестве топлива для работы Мурманской ТЭЦ и котельных города [Zoller et al., 1973; Agrawal et al., 2008; Peltier, Lippmann, 2010]. В результате деятельности автотранспорта V также поступает в окружающую среду в составе твердых частиц, образующихся при неполном сгорании дизельного топлива [Shafer et al., 2012; Khussain et al., 2022]. Истирание шин и тормозных колодок автомобильного транспорта выступает источником обогащения дорожной пыли Zn [Сагет и др., 1990; Hwang et al., 2016]. Однако тут могут иметь место и специфические связи отдельных элементов, интерпретация которых возможна лишь при детальном анализе геохимии пород водосбора. Кроме того, не исключены случайные (даже ложные) корреляции, которые в принципе не поддаются объяснению.

Анализ факторов, влияющих на химический состав озерных вод г. Мурманска

Факторный анализ проводился методом главных компонент с последующим варимакс нормальным вращением полученных факторов. Метод главных компонент основывается на выявлении минимального числа факторов, обладающих наибольшим вкладом в общую дисперсию. Данный анализ позволяет сократить количество переменных и определить структуру взаимосвязей между ними [Sahoo et al., 2015].

Проведенный анализ главных компонент позволил выделить 4 основных фактора, объясняющих 82 % общей дисперсии. За значимые факторные нагрузки принимались те, квадрат коэффициента корреляции которых превышал значения 0,5 (при $p = 0,05$ и $n = 80$). Распределение факторных нагрузок представлено в таблице 3. Под величиной факторных нагрузок следует понимать коэффициенты корреляции между переменными и факторами. Чем больше абсолютное значение факторной нагрузки, тем сильнее связь данной переменной с фактором [Ким, 1989].

Таблица 3. Факторные нагрузки, собственные значения и процент объясняемой дисперсии выявленных факторов

Table 3. Factor loadings, eigenvalues, and percentage of explained variance of the identified factors

	Фактор 1 Factor 1	Фактор 2 Factor 2	Фактор 3 Factor 3	Фактор 4 Factor 4
F	-0,605	-0,669	0,219	0,004
F _{бас}	0,144	-0,155	0,625	0,170
K _{гл}	0,573	0,350	-0,036	0,209
K _{откр}	-0,709	-0,602	0,155	-0,125
Δ F	0,669	0,424	0,226	0,057
pH	0,793	-0,316	-0,044	-0,176
TDS	0,977	-0,064	0,141	0,039
NH ₄	0,171	0,101	0,700	-0,124
Ca	0,961	-0,085	0,179	0,043
Mg	0,982	-0,091	0,100	-0,039
Na	0,952	-0,073	0,126	0,041
K	0,945	-0,207	0,196	0,003
HCO ₃	0,905	-0,146	0,308	-0,053
SO ₄	0,843	-0,282	-0,188	0,221
Cl	0,931	-0,093	0,135	0,046
TN	0,361	0,159	0,653	0,282
TP	0,231	0,256	0,801	0,090
Color	-0,106	0,949	0,024	-0,016
Гум	-0,060	0,960	0,020	-0,082
TOC	0,018	0,928	0,029	-0,174
Si	0,175	0,833	0,300	0,197
ANC	0,896	-0,094	0,309	-0,073
A	0,018	0,928	0,029	-0,174
Al	-0,024	0,753	0,076	0,325
Fe	-0,183	0,761	0,509	0,085
Li	0,954	0,118	0,143	-0,001
V	-0,006	0,216	0,161	0,772
Cr	0,491	0,327	0,079	0,290
Co	0,501	0,472	0,451	0,191
Ni	0,445	0,097	0,256	0,761
Cu	0,055	0,236	-0,218	0,424
Zn	0,017	0,499	0,125	0,660
Rb	0,923	-0,081	0,131	0,163
Sr	0,964	-0,083	0,195	0,049
Y	0,032	0,942	0,068	0,259
Mo	0,846	-0,017	-0,187	0,213
Ba	0,900	0,110	0,222	-0,016
La	-0,181	0,812	0,101	0,239
Pr	-0,106	0,909	0,093	0,305
Nd	-0,069	0,925	0,109	0,247
Sm	-0,078	0,929	0,068	0,259
Gd	-0,036	0,932	0,077	0,231
U	0,879	0,362	-0,179	0,056
Mn	0,009	0,326	0,715	-0,035
Собственные значения Eigenvalues	17,0	13,4	3,2	2,2
% объясняемой дисперсии % of explained variance	38,7	30,4	7,9	4,9

Примечание. Жирным шрифтом выделены факторные нагрузки > 0,5.

Note. Factor loadings > 0.5 are shown in bold.

Первый фактор имеет наибольшую информативность, на его долю приходится 38,7 % от общей объясняемой дисперсии. Данный фактор объединяет такие показатели, как рН, минерализация, кислотонейтрализующая способность вод, содержание главных ионов и некоторых микроэлементов (Sr, Li, Rb, Ba, U, Mo). Первый фактор отражает связь химического состава озерных вод с поступлением вышеперечисленных элементов с водосборных территорий. Поскольку исследованные озера располагаются на урбанизированных территориях, данный фактор отражает как природные (геологическое строение района исследования, морские аэрозоли Баренцева моря), так и антропогенные источники поступления главных ионов, а также щелочных и щелочноземельных металлов. Горные породы выступают в роли первичных источников основных ионов минерализации [Гашкина, 2014]. Геология района исследования представлена изверженными и метаморфическими разностями пород архея и протерозоя: граниты, гнейсы, жильные диабазы, габбро, амфиболиты [Атлас..., 1971]. Однако в условиях урбанизации в результате разрушения инфраструктуры, поступления ливневых вод, повышенной эрозии городских почв, применения противогололедных реагентов основные ионы, щелочные и щелочноземельные металлы с городской пылью, частицами почв или четвертичных отложений могут попадать в водоемы и водотоки [Даувальтер и др., 2021; Слуковский и др., 2023]. Кальцит, доломит, полевошпат, биотит, хлорид и другие минералы, обычно встречающиеся в строительных материалах, при взаимодействии с агрессивными условиями городской среды (например, кислотные дожди) высвобождают катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ [Wright et al., 2011; Camuffo, 2016; Kaushal et al., 2017, 2020]. В процессе разрушения бетонных сооружений в окружающую среду поступают ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} . Цемент, входящий в состав бетона, обладает высокой кислотонейтрализующей способностью (955 мг-экв $\text{CaCO}_3/\text{г}$) и способствует смещению рН среды озерных вод в сторону нейтральных и щелочных значений [Sephton, Webb, 2017; Kaushal et al., 2020].

Уран и молибден, также вошедшие в нагрузку первого фактора, имеют геологическое происхождение. Уран является ведущим литофильным элементом Фенноскандинавского щита [Янин и др., 2016]. Так, на северо-западе Мурманской области располагается Лицевский рудный район, характеризующийся урановыми рудопроявлениями и оруденениями [Ильченко и др., 2022]. Молибден выступает

в качестве сопутствующего элемента в урановых рудах и совместно мигрирует из магматических и метаморфических горных пород с урановым оруденением [Слуковский и др., 2020]. Похожие связи молибдена и урана ранее были установлены при изучении озер южной части Республики Карелия, которая также находится в пределах Фенноскандинавского щита [Slukovskii, 2023].

В первый фактор вошли и такие морфометрические характеристики озер, как площадь водного зеркала, показатель удельного водосбора, коэффициенты открытости и глубинности. Отрицательные значения факторной нагрузки площади водного зеркала свидетельствуют о влиянии слабоминерализованных атмосферных осадков, поступающих в исследованные озера. С увеличением площади водоема происходит снижение значений показателей, входящих в первый фактор. В свою очередь, показатель удельного водосбора демонстрирует обратную тенденцию в отношении первого фактора. Чем больше площадь водосбора по сравнению с площадью зеркала, тем сильнее влияние водосбора на режим водоема. Данная связь обусловлена структурой водного баланса озер. Коэффициент открытости имеет отрицательное значение факторной нагрузки, а коэффициент глубинности – положительное. Коэффициент открытости отражает степень перемешивания водных масс под воздействием климатических факторов, в особенности ветра. А коэффициент глубинности характеризует степень стратифицированности водной массы и различий гидрохимических показателей в поверхностных и придонных слоях озер.

Второй фактор также имеет определяющее влияние на формирование химического состава исследуемых озер. Доля данного фактора в общей дисперсии составляет 30,4 %. Фактор объединяет показатели цветности, гумусности и содержание TOC, Si, A^- , Al, Fe, Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd. Площадь водного зеркала и коэффициент открытости также демонстрируют отрицательные связи со вторым фактором. Наличие тесной связи между содержанием органического вещества и концентрациями Si, Fe, Al, редкоземельных элементов позволяет предположить протекание процессов комплексообразования с органическими кислотами в водах исследованных озер. Органические вещества, в особенности гуминовые и фульвовые кислоты, из-за особенностей их строения способны проявлять сильное сродство к комплексообразованию с гидроксидами Fe и Al, ионами металлов и редкоземельных элементов [Tang, Johannesson, 2003; Catrouillet et al.,

2019; Xiao, Riise, 2021; Lafrenière et al., 2023]. Так, способность редкоземельных элементов образовывать комплексы с гумусовыми веществами зависит от ряда факторов, среди которых – значения pH, концентрации растворенного органического вещества и ионная сила конкурирующих ионов [Tang, Johannesson, 2003]. В водоемах со слабокислой и кислой реакцией среды, а также высоким содержанием органического вещества редкоземельные элементы в большей степени образуют комплексные соединения органической природы [Johannesson et al., 2004; Гусева и др., 2012]. В щелочных водах (pH > 8,5) с низким содержанием органического вещества или преобладающим подземным типом питания редкоземельные элементы склонны образовывать комплексы с карбонатами и лигандами неорганического происхождения (гидроксиды Fe, Al, Mn) [Biddau et al., 2002; Lafrenière et al., 2023]. В свою очередь, гумусовые вещества при взаимодействии с ионами кремния способны образовывать устойчивые кремнийорганические соединения [Костикова и др., 2016]. В водоемах и водотоках гумидной зоны (Карелия) установлена линейная зависимость (коэффициент корреляции составил 0,85) между содержанием растворенного органического кремния и показателем гумусности, характеризующим органическое вещество аллохтонного происхождения [Рыжаков и др., 2019]. Таким образом, второй фактор обуславливает совместное поступление вышеперечисленных элементов в составе аллохтонного органического вещества и отражает влияние состава почв, слагающих водосборные территории исследуемых озер.

Процент третьего фактора от суммы общей объясняемой дисперсии составляет 7,9. Данный фактор объединил в себе гидрохимические показатели, которые демонстрируют тенденцию к накоплению в придонных слоях исследуемых озер, а именно NH_4 , TN, TP, Fe, Mn. Вероятно, третий фактор обуславливается эвтрофикацией исследованных озер, а также образованием восстановительных условий внутри водоемов. В процессе эвтрофирования в водных объектах происходит накопление биогенных веществ, в частности азота и фосфора, поступающих с водосборных территорий, о чем свидетельствует корреляция площади водосборного бассейна с третьим фактором. В придонных горизонтах кислород потребляется для разложения органического материала, что способствует образованию восстановительных условий [Даувальтер, 2006]. Железо и марганец чутко реагируют на изменение редокс-условий, в восстановительной обстановке способны

переходить в растворенное состояние и высвобождаться из донных отложений [Горленко и др., 1977].

Стоит отметить, что в данный фактор не вошли такие параметры, как коэффициенты глубинности и открытости озерной котловины, которые характеризуют степень перемешивания водных масс, возможности возникновения стратификации и различий концентраций химических показателей в поверхностных и придонных слоях водоемов [Лопух, Якушко, 2011]. Это, согласно результатам факторного анализа, исключает влияние сезонной стратификации и ветрового перемешивания водных масс на содержание и распределение NH_4 , TN, TP, Fe, Mn.

Четвертый фактор характеризуется наименьшим процентом (4,9 %) от общей объясняемой дисперсии. Несмотря на низкий вклад четвертого фактора в процент общей дисперсии, он отражает особенности локальной антропогенной нагрузки на водоемы и объединяет в себе такие металлы, как Ni, V и Zn.

Заключение

Таким образом, на основе выполненного статистического анализа данных установлено, что химический состав вод исследованных озер определяется комплексным воздействием природных и антропогенных факторов. При проведении корреляционного анализа выявлены закономерные зависимости показателей pH, минерализации, кислотонейтрализующей способности вод от содержания главных ионов, а также щелочных и щелочноземельных металлов в исследованных озерах. Установлена связь между косвенными показателями содержания органического вещества (ТОС, цветность, гумусность) и концентрациями типоморфных (Fe, Al) и редкоземельных (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd) элементов.

Метод главных компонент позволил выявить 4 значимых фактора, объясняющих 82 % общей дисперсии. Первые два фактора обладают наибольшей информативностью и объясняют соответственно 38,7 и 30,4 % от общей дисперсии. В свою очередь, третий (7,9) и четвертый (4,9) факторы характеризуются низким процентным вкладом в общую дисперсию. Первый фактор объединяет такие показатели, как pH, TDS, ANC, концентрации главных ионов и следующих микроэлементов: Sr, Li, Rb, Ba, U, Mo. Также в данный фактор вошли такие морфометрические показатели озер, как площадь водного зеркала, показатель удельного водосбора, коэффициенты открытости и глубинности.

Первый фактор отражает региональные особенности района исследования, в частности геологическое строение водосборных территорий и влияние морских аэрозолей, поступающих от Баренцева моря. Однако в связи с тем, что объекты исследования расположены на урбанизированной территории, из данного фактора нельзя исключать антропогенные источники поступления главных ионов, щелочных и щелочноземельных металлов. Второй фактор обуславливает влияние почвенного покрова на химический состав озерных вод и определяет совместное поступление Si, Al, Fe и редкоземельных элементов (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd) в составе аллохтонного органического вещества в исследованные озера. Третий фактор объединил в себе факторные нагрузки по следующим показателям: площадь водосборного бассейна и концентрации NH_4^+ , TN, TP, Fe, Mn в озерных водах. Вероятно, в качестве третьего фактора выступает процесс эвтрофикации озер, а также окислительно-восстановительные условия внутри водоемов. Четвертый фактор демонстрирует локальную антропогенную нагрузку (сжигание мазутного топлива, деятельность автомобильного транспорта) на водоемы и объединяет в себе микроэлементы техногенного происхождения (Ni, V, Zn).

Авторы искренне благодарят А. А. Черепанова за помощь в отборе проб и составлении карты территории исследований, а также Л. П. Кудрявцеву, А. С. Парамонова за качественные аналитические исследования.

Литература

- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 442 с.
- Атлас Мурманской области / Ред. В. Д. Милосердов и др. М.: ГУГК НИГЭИ ЛГУ, 1971. 33 с.
- Базова М. М. Геохимические закономерности формирования вод малых озер кольского региона в условиях аэротехногенного загрязнения: дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2016. 170 с.
- Гашкина Н. А. Пространственно-временная изменчивость химического состава вод малых озер в современных условиях изменения окружающей среды: дис. ... докт. геогр. наук. М., 2014. 207 с.
- Горленко В. М., Дубинина Г. А., Кузнецов С. И. Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977. 289 с.
- Григорьев С. В. О некоторых определениях и показателях в озероведении // Труды Карельского филиала АН СССР. 1959. Вып. 18. С. 29–45.
- Гусева Н. В., Копылова Ю. Г., Леушина С. К. Распространенность редкоземельных элементов в природных водах междуречья Юньяхи и Ензоряхи (восточный склон Полярного Урала) // Вода: химия и экология. 2012. № 12. С. 121–129.
- Даувальтер В. А. Исследование физического и химического состава донных отложений при оценке экологического состояния водоемов. Учеб. пособие по дисциплине «Геохимия окружающей среды». Мурманск: Изд-во МГТУ, 2006. 84 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области: монография. В 3 ч. Ч. 2. Гидрохимия водоемов. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2014. 222 с.
- Даувальтер В. А., Слуковский З. И., Денисов Д. Б., Черепанов А. А. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66, № 2. С. 252–266. doi: 10.21638/spbu07.2021.204
- Дину М. И., Баранов Д. Ю. Роль органических веществ гумусовой природы в формировании равновесных форм элементов в водах озер Кольского полуострова: экспериментальные исследования и расчетные результаты // Геохимия. 2022. Т. 67, № 1. С. 57–68. doi: 10.31857/S0016752522010058
- Ильченко В. Л., Афанасьева Е. Н., Каулина Т. В., Лялина Л. М., Ниткина Е. А., Мокрушина О. Д. Лицевское рудопроявление урана (арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые результаты петрофизических и геохимических исследований // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 393–404. doi: 10.31897/PMI.2022.44
- Казак Е. С., Лебедева Е. Г., Харитоновна Н. А., Челноков Г. А., Еловский Е. В. Фракционирование редкоземельных элементов и иттрия в водных средах: роль органотрофных бактерий // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2021. № 3. С. 99–112.
- Ким Д. О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Костикова Л. А., Шиян Л. Н., Мачехина К. И., Егоров Н. Б. Образование кремнийорганических соединений в процессах очистки воды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 1. С. 60–67.
- Кошелева О. Ю. Оценка запечатанности почвенного покрова города Волгограда // Вестник ВГУ. Сер. География. Геоэкология. 2019. № 1. С. 12–18. doi: 10.17308/geo.2019.1/2280
- Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.
- Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Бородулина Г. С., Ефременко Н. А., Сабылина А. В., Зобков М. Б., Зайцев Д. О., Басова С. А., Калмыков М. В., Перская Е. А., Степанова И. А., Чесалина Г. Л., Родькина И. С., Кравченко И. Ю., Птица А. И., Галахина Н. Е., Зобкова М. В., Икко О. И., Ефремова Т. А., Кулик Н. В. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Ред. П. А. Лозовик, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Лопух П. С., Якушко О. Ф. Общая лимнология: пособие для студентов геогр. фак. Минск: БГУ, 2011. 366 с.

- Моисеенко Т. И., Дауальтер В. А., Родюшкин И. В. Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме (на примере озера Имандра). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. 127 с.
- Моисеенко Т. И., Дауальтер В. А., Лукин А. А., Кудрявцева Л. П., Ильяшук Б. П., Ильяшук Л. И., Сандимиров С. С., Каган Л. Я., Вандыш О. И., Шаров А. Н., Шарова Ю. Н., Королева И. Н. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука, 2002. 487 с.
- Моисеенко Т. И., Калабин Г. В., Хорошавин В. Ю. Закисление водосборов арктических регионов // Известия РАН. Сер. геогр. 2015. № 2. С. 49–58. doi: 10.15356/0373-2444-2012-2-49-58
- Моисеенко Т. И., Дину М. И. Феномен нарастания органических кислот в природных водах и их влияние на закисление вод // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460, № 5. С. 574–574. doi: 10.7868/S0869565215050205
- Моисеенко Т. И., Дину М. И., Гашкина Н. А., Кремлева Т. А., Хорошавин В. Ю. Геохимические закономерности распространения элементов в водах озер арктических регионов // Геохимия. 2020. Т. 65, № 6. С. 521–532. doi: 10.31857/S0016752520060084
- Никаноров А. М. Гидрохимия. 2-е изд. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
- Порунов А. Н. Методика приведения ненормально распределенного ряда к нормальному распределению и оценка методической ошибки // Прикладная информатика. 2011. № 2(32). С. 3–11.
- Рыжаков А. В., Вапиров В. В., Степанова И. А. Кремний в поверхностных водах гумидной зоны (на примере водных объектов Карелии) // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 3. С. 52–60. doi: 10.17076/lim942
- Сает Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л., Павлова Л. Н., Трефилова Н. Я., Ачкасова А. И., Саркисян С. Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Слуковский З. И., Светов С. А. Геохимические индикаторы техногенного загрязнения донных отложений малых рек в урбанизированной среде // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 38–45.
- Слуковский З. И., Денисов Д. Б., Дауальтер В. А., Зубова Е. М., Мязин В. А., Гузева А. В., Черепанов А. А., Постева М. А., Валькова С. А., Терентьев П. М., Фокина Н. В., Косова А. Л., Постнова С. В., Сошина А. С. Озера города Мурманска: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические особенности. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 174 с.
- Слуковский З. И., Гузева А. В., Дауальтер В. А., Удачин В. Н., Денисов Д. Б. Урановые аномалии в современных донных отложениях озер северной части Мурманской области, Арктика // Геохимия. 2020. Т. 65, № 12. С. 1231–1236. doi: 10.31857/S0016752520100131
- Черногаева Г. М., Жадановская Е. А., Журавлева Л. Р., Малеванов Ю. А. Загрязнение окружающей среды в регионах России в начале XXI века. М.: Полиграф-Плюс, 2019. 232 с.
- Янин Е. П., Кузьмич В. Н., Иваницкий О. М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 6. С. 3–72.
- Agrawal H., Malloy Q. G. J., Welch W. A., Miller J. W., Cocker III D. R. In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel // Atmos. Environ. 2008. Vol. 42, no. 21. P. 5504–5510. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.053
- Algül F., Beyhan M. Concentrations and sources of heavy metals in shallow sediments in Lake Bafa, Turkey // Scientific Reports. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 1782. doi: 10.1038/s41598-020-68833-2
- Aschan O. Die wasserlöslichen Humusstoffe (Humussole) der nordischen Süßgewässer // J. Prakt. Chemie. 1908. Vol. 77(1). P. 172–188. doi: 10.1002/prac.19080770114
- Ayala-Borda P., Lovejoy C., Power M., Rautio M. Evidence of eutrophication in Arctic lakes // Arct. Sci. 2021. Vol. 7, no. 4. P. 859–871. doi: 10.1139/as-2020-0033
- Bazova M. M. Specifics of the elemental composition of waters in environments with operating mining and ore-processing plants in the Kola North // Geochem. Int. 2017. Vol. 55, no. 1. P. 131–143. doi: 10.1134/S0016702917010025
- Biddau R., Cidu R., Frau F. Rare earth elements in waters from the albitite-bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy // Chem. Geol. 2002. Vol. 182, no. 1. P. 1–14. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00272-8
- Box G. E. P., Cox D. R. An analysis of transformations // J. R. Stat. Soc. B (Methodological). 1964. Vol. 26, no. 2. P. 211–252. doi: 10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x
- Camuffo D. Weathering of building materials // Urban Pollution and Changes to Materials and building surfaces. London: Imperial College Press, 2016. P. 19–64. doi: 10.1142/9781783268863_0002
- Catrouillet C., Guenet H., Pierson-Wickmann A. C., Dia A., Bouhnik-LeCoz M., Deville S., Lenne Q., Suko Ya., Davranche M. Rare earth elements as tracers of active colloidal organic matter composition // Environ. Chem. 2019. Vol. 17, no. 2. P. 133–139. doi: 10.1071/EN19159
- Clesceri L. S., Greenberg A. E., Eaton A. D. Standard methods for examination for water and wastewater. 20th ed. Washington: American Public Health Association USA, 1999. 2671 p.
- Gomes P., Valente T., Marques R., Prudêncio M. I., Pamplona J. Rare earth elements-Source and evolution in an aquatic system dominated by mine-Influenced waters // J. Environ. Manag. 2022. Vol. 322. Art. 116125. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116125
- Gradilla-Hernández M. S., de Anda J., García-Gonzalez A., Meza-Rodríguez D., Yebra Montes C., Perfecto-Avalos Y. Multivariate water quality analysis of Lake Cajititlán, Mexico // Environ. Monit. Assess. 2020. Vol. 192, no. 1. P. 5. doi: 10.1007/s10661-019-7972-4
- Henriksen A., Kämäri J., Posch M., Wilander A. Critical loads of acidity: Nordic surface waters // Ambio. 1992. Vol. 21, no. 5. P. 356–363.

- Hwang H. M., Fiala M. J., Park D., Wade T. L. Review of pollutants in urban road dust and stormwater runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles // *Int. J. Urban Sci.* 2016. Vol. 20, no. 3. P. 334–360. doi: 10.1080/12265934.2016.1193041
- Johannesson K. H., Tang J., Daniels J. M., Bounds W. J., Burdige D. J. Rare earth element concentrations and speciation in organic-rich blackwaters of the Great Dismal Swamp, Virginia, USA // *Chem. Geol.* 2004. Vol. 209, no. 3–4. P. 271–294. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.012
- Kashulin N., Kashulina T., Bekkelund A. Long-term eutrophication and dynamics of bloom-forming microbial communities during summer HAB in large Arctic lake // *Environments*. 2021. Vol. 8, no. 8. P. 82. doi: 10.3390/environments8080082
- Kaushal S. S., Duan S., Doody T. R., Haq Sh., Smith R. M., Newcomer Johnson T. A., Delaney Newcomb K., Gorman J., Bowman N., Mayer P. M., Wood K. L., Belt K. T., Stack W. P. Human-accelerated weathering increases salinization, major ions, and alkalization in fresh water across land use // *Appl. Geochem.* 2017. Vol. 83. P. 121–135. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.02.006
- Kaushal S. S., Wood K. L., Galella J. G., Gion A. M., Haq Sh., Goodling Ph. J., Haviland K. A., Reimer J. E., Morel C. J., Wessel B., Nguyen W., Hollingsworth J. W., Mei K., Leal J., Widmer J., Sharif R., Mayer P. M., Newcomer Johnson T. A., Delaney Newcomb K., Smith E., Belt K. T. Making «chemical cocktails» – Evolution of urban geochemical processes across the periodic table of elements // *Appl. Geochem.* 2020. Vol. 119. P. 104632. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104632
- Khan M. S. I., Islam N., Uddin J., Islam S., Kamal Nasir M. Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34, no. 8. P. 4773–4781. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.06.003
- Khussain B., Brodskiy A., Sass A., Rakhmetova K., Yaskevich V., Grigor'eva V., Ishmukhamedov A., Shapovalov A., Shlygina I., Tungatarova S., Khussain A. Synthesis of vanadium-containing catalytically active phases for exhaust gas neutralizers of motor vehicles and industrial enterprises // *Catalysts*. 2022. Vol. 12, no. 8. Art. 842. doi: 10.3390/catal12080842
- Kritzberg E. S., Ekström S. M. Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? // *Biogeosci.* 2012. Vol. 9, no. 4. P. 1465–1478. doi: 10.5194/bg-9-1465-2012
- Lafrenière M. C., Lapierre J. F., Ponton D. E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2023. Vol. 353. P. 129–141. doi: 10.1016/j.gca.2023.05.019
- Li G., Li X., Jiang X., Zhang Y., Li H., Zhang J., Cai G., Luo K., Xie F. Occurrence and source analysis of heavy metals and dissolved organic matter in Nanyi Lake, Anhui Province // *Environ. Monit. Assess.* 2023. Vol. 195. Art. 660. doi: 10.1007/s10661-023-11226-5
- Moiseenko T. I. Anthropogenic processes in continental waters of Arctic regions and criteria for their assessment // *Water Resources*. 2018. Vol. 45. P. 578–588. doi: 10.1134/S032105961804017X
- Moiseenko T. I., Gashkina N. A., Dinu M. I., Kremleva T. A., Khoroshavin V. Y. Water chemistry of Arctic lakes under airborne contamination of watersheds // *Water*. 2020. Vol. 12, no. 6. P. 1659. doi: 10.3390/w12061659
- Moiseenko T. I., Bazova M. M., Gashkina N. A. Development of lake from acidification to eutrophication in the arctic region under reduced acid deposition and climate warming // *Water*. 2022. Vol. 14, no. 21. P. 3467. doi: 10.3390/w14213467
- Neubauer E., Köhler S. J., von der Kammer F., Laudon H., Hofmann T. Effect of pH and stream order on iron and arsenic speciation in boreal catchments // *Environ. Sci. Technol.* 2013. Vol. 47, no. 13. P. 7120–7128. doi: 10.1021/es401193j
- Oliver B. G., Thurman E. M., Malcolm R. L. The contribution of humic substances to the acidity of colored natural waters // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. Vol. 47, no. 11. P. 2031–2035. doi: 10.1016/0016-7037(83)90218-1
- Osadchyy V., Nabyvanets B., Osadcha N., Nabyvanets Y., Linnik P. Processes determining surface water chemistry. Amsterdam: Springer Int. Publ., 2016. 265 p. doi: 10.1007/978-3-319-42159-9
- Peltier R. E., Lippmann M. Residual oil combustion: 2. Distributions of airborne nickel and vanadium within New York City // *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2010. Vol. 20. P. 342–350. doi: 10.1038/jes.2009.28
- Postevaya M. A., Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Bernadskaya D. S. Estimation of heavy metal concentrations in the water of urban lakes in the Russian Arctic (Murmansk) // *Water*. 2021. Vol. 13, no. 22. P. 3267. doi: 10.3390/w13223267
- Postevaya M., Dauvalter V., Slukovskii Z., Kudryavtseva L. Chemical composition and trophic status of urban lakes of the Arctic zone of the Russian Federation (Murmansk) // *Ecohydrology*. 2023. Vol. 16, no. 2. e2505. doi: 10.1002/eco.2505
- Sahoo M. M., Patra K. C., Khatua K. K. Inference of water quality index using ANFIA and PCA // *Aquatic Procedia*. 2015. Vol. 4. P. 1099–1106. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.139
- Sephton M. G., Webb J. A. Application of Portland cement to control acid mine drainage generation from waste rocks // *Appl. Geochem.* 2017. Vol. 81. P. 143–154. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.03.017
- Shafer M. M., Toner B. M., Overdier J. T., Schauer J. J., Fakra S. C., Hu Sh., Herner J. D., Ayala A. Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols // *Environ. Sci. Technol.* 2012. Vol. 46, no. 1. P. 189–195. doi: 10.1021/es200463c
- Shapiro J. Effect of yellow organic acids on iron and other metals in water // *J. Am. Water Works Ass.* 1964. Vol. 56, no. 8. P. 1062–1082. doi: 10.1002/j.1551-8833.1964.tb01303.x
- Sholkovitz E. R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries // *Aquat. Geochem.* 1995. Vol. 1. P. 1–34. doi: 10.1007/BF01025229

Skjelkvåle B. L., Bishop K., Laudon H., Wilander A., Yakovlev V. Effects on freshwater ecosystems // AMAP Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo: Norway, 2007. 112 p.

Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A., Denisov D., Cherepanov A., Siroezhko E. The hydrochemistry and recent sediment geochemistry of small lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia // *Water*. 2020. Vol. 12, no. 4. P. 1130. doi: 10.3390/w12041130

Slukovskii Z. Uranium in lake sediments of humid zone: A case study in the Southeast Fennoscandia (Karelia, Russia) // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 7. P. 1360. doi: 10.3390/w15071360

Tang J., Johannesson K. H. Speciation of rare earth elements in natural terrestrial waters: assessing the role of dissolved organic matter from the modeling approach // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2003. Vol. 67, no. 13. P. 2321–2339. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01413-8

Wright I. A., Davies P. J., Findlay S. J., Jonasson O. J. A new type of water pollution: concrete drainage infrastructure and geochemical contamination of urban waters // *Mar. Freshwater Res.* 2011. Vol. 62, no. 12. P. 1355–1361. doi: 10.1071/MF10296

Xiao Y., Riise G. Coupling between increased lake color and iron in boreal lakes // *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 767. Art. 145104. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145104

Xiao Y. H., Råike A., Hartikainen H., Vähätalo A. V. Iron as a source of color in river waters // *Sci. Total Environ.* 2015. Vol. 536. P. 914–923. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.092

Yevtushenko N. Y., Dudnyk S. V., Rudyk-Leuska N. Y., Khyzhniak M. I. Factors determining the degree of heavy metals' toxicity to fish (a review) // *Hydrobiol. J.* 2021. Vol. 57, no. 4. P. 75–85. doi: 10.1615/HydrobJ.v57.i4.70

Zoller W. H., Gordon G. E., Gladney E. S., Jonesl A. G. The sources and distribution of vanadium in the atmosphere // *Trace Elements in the Environment*. Ch. 3. Washington: American Chemical Society, 1973. P. 31–47. doi: 10.1021/ba-1973-0123.ch003

References

Agrawal H., Malloy Q. G. J., Welch W. A., Miller J. W., Cocker III D. R. In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel. *Atmos. Environ.* 2008;42(21):5504–5510. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.053

Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1970. 442 p. (In Russ.)

Algül F., Beyhan M. Concentrations and sources of heavy metals in shallow sediments in Lake Bafa, Turkey. *Scientific Reports*. 2020;10(1):1782. doi: 10.1038/s41598-020-68833-2

Aschan O. Soluble humus material of northern fresh waters. *J. Prakt. Chemie*. 1908;77(1):172–188. (In German). doi: 10.1002/prac.19080770114

Ayala-Borda P., Lovejoy C., Power M., Rautio M. Evidence of eutrophication in Arctic lakes. *Arct. Sci.* 2021;7(4):859–871. doi: 10.1139/as-2020-0033

Bazova M. M. Geochemical patterns of water formation in small lakes of the Kola region under conditions

of aerotechnogenic pollution: DSc. (Cand. of Geol.-Miner.). Moscow; 2016. 170 p. (In Russ.)

Bazova M. M. Specifics of the elemental composition of waters in environments with operating mining and ore-processing plants in the Kola North. *Geochem. Int.* 2017;55(1):131–143. doi: 10.1134/S0016702917010025

Biddau R., Cidu R., Frau F. Rare earth elements in waters from the albitite-bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy. *Chem. Geol.* 2002;182(1):1–14. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00272-8

Box G. E. P., Cox D. R. An analysis of transformations. *J. R. Stat. Soc. B (Methodological)*. 1964;26(2): 211–252. doi: 10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x

Camuffo D. Weathering of building materials. *Urban Pollution and Changes to Materials and building surfaces*. London: Imperial College Press; 2016. P. 19–64. doi: 10.1142/9781783268863_0002

Catrouillet C., Guenet H., Pierson-Wickmann A. C., Dia A., Bouhnik-LeCoz M., Deville S., Lenne Q., Suko Ya., Davranche M. Rare earth elements as tracers of active colloidal organic matter composition. *Environ. Chem.* 2019;17(2):133–139. doi: 10.1071/EN19159

Chernogaeva G. M., Zhadanovskaya E. A., Zhuravleva L. R., Malevanov Yu. A. Environmental pollution in regions of Russia at the beginning of the 21st century. Moscow: Poligraf-Plyus; 2019. 232 p. (In Russ.)

Clescerl L. S., Greenberg A. E., Eaton A. D. Standard methods for examination for water and wastewater. 20th ed. Washington: American Public Health Association USA; 1999. 2671 p.

Dauvalter V. A. Study of the physical and chemical composition of bottom sediments when assessing the ecological state of reservoirs. A study guide for the course of Environmental Geochemistry. Murmansk: MSTU; 2006. 84 p. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Geoecology of lakes in the Murmansk Region: monograph. In 3 vol. Part 2. Hydrochemistry of reservoirs. Murmansk: MSTU; 2014. 222 p. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Slukovskii Z. I., Denisov D. B., Cherepanov A. A. Features of the chemical composition of water in urban lakes in Murmansk. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of St. Petersburg University. Geosciences*. 2021;66(2):252–266. (In Russ.). doi: 10.21638/spbu07.2021.204

Dinu M. I., Baranov D. Y. The role of organic substances of humus nature in the formation of equilibrium forms of elements in the waters of the Kola Peninsula lakes: experimental studies and calculated results. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2022;67(1):57–68. (In Russ.). doi: 10.31857/S0016752522010058

Gashkina N. A. Spatiotemporal variability of the chemical composition of waters of small lakes in modern conditions of environmental change: DSc. (Dr. of Geogr.) thesis. Moscow; 2014. 207 p. (In Russ.)

Gomes P., Valente T., Marques R., Prudêncio M. I., Pamplona J. Rare earth elements-Source and evolution in an aquatic system dominated by mine-Influenced waters. *J. Environ. Manag.* 2022;322:116125. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116125

- Gorlenko V. M., Dubinina G. A., Kuznetsov S. I. Ecology of aquatic microorganisms. Moscow: Nauka; 1977. 289 p. (In Russ.)
- Gradilla-Hernández M. S., de Anda J., Garcia-Gonzalez A., Meza-Rodríguez D., Yebra Montes C., Perfecto-Avalos Y. Multivariate water quality analysis of Lake Cajititlán, Mexico. *Environ. Monit. Assess.* 2020;192(1):5. doi: 10.1007/s10661-019-7972-4
- Grigoriev S. V. On some definitions and indicators in lake science. *Trudy Karelskogo filiala AN SSSR = Proceedings of the Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences.* 1959;18:29–45. (In Russ.)
- Guseva N. V., Kopylova Yu. G., Leushina S. K. Prevalence of rare earth elements in natural waters between the Yuniyakh and Enzoryakh rivers (eastern slope of the Polar Urals). *Voda: khimiya i ekologiya = Water: chemistry and ecology.* 2012;12:121–129. (In Russ.)
- Henriksen A., Kämäri J., Posch M., Wilander A. Critical loads of acidity: Nordic surface waters. *Ambio.* 1992;21(5):356–363.
- Hwang H. M., Fiala M. J., Park D., Wade T. L. Review of pollutants in urban road dust and storm-water runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles. *Int. J. Urban Sci.* 2016;20(3):334–360. doi: 10.1080/12265934.2016.1193041
- Ilchenko V. L., Afanasyeva E. N., Kaulina T. V., Lyalina L. M., Nitkina E. A., Mokrushina O. D. The Litsevskeye uranium ore manifestation (Arctic zone of the Fennoscandian Shield): new results of petrophysical and geochemical studies. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute.* 2022;255:393–404. (In Russ.). doi: 10.31897/PMI.2022.44
- Johannesson K. H., Tang J., Daniels J. M., Bounds W. J., Burdige D. J. Rare earth element concentrations and speciation in organic-rich blackwaters of the Great Dismal Swamp, Virginia, USA. *Chem. Geol.* 2004;209(3-4):271–294. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.012
- Kashulin N., Kashulina T., Bekkelund A. Long-term eutrophication and dynamics of bloom-forming microbial communities during summer HAB in large Arctic lake. *Environments.* 2021;8(8):82. doi: 10.3390/environments8080082
- Kaushal S. S., Duan S., Doody T. R., Haq Sh., Smith R. M., Newcomer Johnson T. A., Delaney Newcomb K., Gorman J., Bowman N., Mayer P. M., Wood K. L., Belt K. T., Stack W. P. Human-accelerated weathering increases salinization, major ions, and alkalization in fresh water across land use. *Appl. Geochem.* 2017;83:121–135. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.02.006
- Kaushal S. S., Wood K. L., Galella J. G., Gion A. M., Haq Sh., Goodling Ph. J., Haviland K. A., Reimer J. E., Morel C. J., Wessel B., Nguyen W., Hollingsworth J. W., Mei K., Leal J., Widmer J., Sharif R., Mayer P. M., Newcomer Johnson T. A., Delaney Newcomb K., Smith E., Belt K. T. Making «chemical cocktails» – Evolution of urban geochemical processes across the periodic table of elements. *Appl. Geochem.* 2020;119:104632. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104632
- Kazak E. S., Lebedeva E. G., Kharitonova N. A., Chelnokov G. A., Elovsky E. V. Fractionation of rare earth elements and yttrium in aquatic environments: the role of organotrophic bacteria. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya = Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology.* 2021;3:99–112. (In Russ.)
- Khan M. S. I., Islam N., Uddin J., Islam S., Kamal Nasir M. Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences.* 2022;34(8):4773–4781. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.06.003
- Khussain B., Brodskiy A., Sass A., Rakhmetova K., Yaskevich V., Grigor'eva V., Ishmukhamedov A., Shapovalov A., Shlygina I., Tungatarova S., Khussain A. Synthesis of vanadium-containing catalytically active phases for exhaust gas neutralizers of motor vehicles and industrial enterprises. *Catalysts.* 2022;12(8):842. doi: 10.3390/catal12080842
- Kim D. O. Factorial, discriminant, and cluster analysis. Moscow: Finansy i statistika; 1989. 215 p. (In Russ.)
- Kosheleva O. Yu. Assessment of soil cover sealing in the city of Volgograd. *Vestnik VGU. Ser. Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of VSU. Series: Geography. Geoecology.* 2019;1:12–18. (In Russ.). doi: 10.17308/geo.2019.1/2280
- Kostikova L. A., Shiyan L. N., Machekhina K. I., Egorov N. B. Formation of organosilicon compounds in water purification processes. *Izvestiya TPU. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2016;327(1):60–67. (In Russ.)
- Kritzberg E. S., Ekström S. M. Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? *Biogeosci.* 2012;9(4):1465–1478. doi: 10.5194/bg-9-1465-2012
- Lafrenière M. C., Lapierre J. F., Ponton D. E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2023;353:129–141. doi: 10.1016/j.gca.2023.05.019
- Li G., Li X., Jiang X., Zhang Y., Li H., Zhang J., Cai G., Luo K., Xie F. Occurrence and source analysis of heavy metals and dissolved organic matter in Nanyi Lake, Anhui Province. *Environ. Monit. Assess.* 2023;195:660. doi: 10.1007/s10661-023-11226-5
- Lopukh P. S., Yakushko O. F. General limnology: a manual for geography students. Minsk: BSU; 2011. 366 p. (In Russ.)
- Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria for the state of surface waters in the humid zone and their resilience to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)
- Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Borodulina G. S., Efremenko N. A., Sabylina A. V., Zobkov M. B., Zaitsev D. O., Basova S. A., Kalmykov M. V., Perskaya E. A., Stepanova I. A., Chesalina G. L., Rod'kina I. S., Kravchenko I. Yu., Ptitsa A. I., Galakhina N. E., Zobkova M. V., Ikko O. I., Efremova T. A., Kulik N. V. Analytical, kinetic, and calculation methods in hydrochemical practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)
- Miloserdov V. D. et al. (eds.). Atlas of the Murmansk Region. Moscow: GUGK NIGEL LGU; 1971. 33 p. (In Russ.)

- Moiseenko T. I. Anthropogenic processes in continental waters of Arctic regions and criteria for their assessment. *Water Resources*. 2018;45:578–588. doi: 10.1134/S032105961804017X
- Moiseenko T. I., Bazova M. M., Gashkina N. A. Development of lake from acidification to eutrophication in the arctic region under reduced acid deposition and climate warming. *Water*. 2022;14(21):3467. doi: 10.3390/w14213467
- Moiseenko T. I., Dauvalter V. A., Rodyushkin I. V. Geochemical migration of elements in a subarctic water body (a case study of Lake Imandra). Apatity: KSC RAS; 1997. 127 p. (In Russ.)
- Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Lukin A. A., Kudryavtseva L. P., Il'yashchuk B. P., Il'yashchuk L. I., Sandimirov S. S., Kagan L. Ya., Vandysh O. I., Sharov A. N., Sharova Yu. N., Koroleva I. N. Anthropogenic modifications of the ecosystem of Lake Imandra. Moscow: Nauka; 2002. 487 p. (In Russ.)
- Moiseenko T. I., Dinu M. I. The phenomenon of increasing organic acids in natural waters and their impact on water acidification. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2015;460(5):574–578. (In Russ.). doi: 10.7868/S0869565215050205
- Moiseenko T. I., Dinu M. I., Gashkina N. A., Kremleva T. A., Khoroshavin V. Y. Geochemical features of elements distributions in the lake waters of the Arctic Region. *Geochem. Int.* 2020;58(6):613–623. doi: 10.1134/S0016702920060087
- Moiseenko T. I., Gashkina N. A., Dinu M. I., Kremleva T. A., Khoroshavin V. Y. Water chemistry of Arctic lakes under airborne contamination of watersheds. *Water*. 2020;12(6):1659. doi: 10.3390/w12061659
- Moiseenko T. I., Kalabin G. V., Khoroshavin V. Yu. Acidification of catchments in Arctic regions. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2015;2: 49–58. (In Russ.). doi: 10.15356/0373-2444-2012-2-49-58
- Neubauer E., Köhler S. J., von der Kammer F., Laudon H., Hofmann T. Effect of pH and stream order on iron and arsenic speciation in boreal catchments. *Environ. Sci. Technol.* 2013;47(13):7120–7128. doi: 10.1021/es401193j
- Nikanorov A. M. Hydrochemistry. 2nd ed. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 2001. 444 p. (In Russ.)
- Oliver B. G., Thurman E. M., Malcolm R. L. The contribution of humic substances to the acidity of colored natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983;47(11): 2031–2035. doi: 10.1016/0016-7037(83)90218-1
- Osadchyy V., Nabyvanets B., Osadcha N., Nabyvanets Y., Linnik P. Processes determining surface water chemistry. Amsterdam: Springer Int. Publ.; 2016. 265 p. doi: 10.1007/978-3-319-42159-9
- Peltier R. E., Lippmann M. Residual oil combustion: 2. Distributions of airborne nickel and vanadium within New York City. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2010;20:342–350. doi: 10.1038/jes.2009.28
- Porunov A. N. Methodology for transforming a non-normally distributed series into a normal distribution and estimating methodological error. *Prikladnaya informatika = Applied Informatics*. 2011;2(32):3–11. (In Russ.)
- Postevaya M., Dauvalter V., Slukovskii Z., Kudryavtseva L. Chemical composition and trophic status of urban lakes of the Arctic zone of the Russian Federation (Murmansk). *Ecohydrology*. 2023;16(2):e2505. doi: 10.1002/eco.2505
- Postevaya M. A., Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Bernadskaya D. S. Estimation of heavy metal concentrations in the water of urban lakes in the Russian Arctic (Murmansk). *Water*. 2021;13(22):3267. doi: 10.3390/w13223267
- Ryzhakov A. V., Vapirov V. V., Stepanova I. A. Silicon in surface waters of the humid zone (the case of Karelian water bodies). *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;3:52–60. (In Russ.). doi: 10.17076/lim942
- Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P., Smirnova R. S., Basharkevich I. L., Onishchenko T. L., Pavlova L. N., Trefilova N. Ya., Achkasova A. I., Sarkisyan S. Sh. Geochemistry of the environment. Moscow: Nedra; 1990. 335 p. (In Russ.)
- Sahoo M. M., Patra K. C., Khatua K. K. Inference of water quality index using ANFIA and PCA. *Aquatic Procedia*. 2015;4:1099–1106. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.139
- Sephton M. G., Webb J. A. Application of Portland cement to control acid mine drainage generation from waste rocks. *Appl. Geochem.* 2017;81:143–154. doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.03.017
- Shafer M. M., Toner B. M., Overdier J. T., Schauer J. J., Fakra S. C., Hu Sh., Herner J. D., Ayala A. Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols. *Environ. Sci. Technol.* 2012;46(1): 189–195. doi: 10.1021/es200463c
- Shapiro J. Effect of yellow organic acids on iron and other metals in water. *J. Am. Water Works Ass.* 1964;56(8):1062–1082. doi: 10.1002/j.1551-8833.1964.tb01303.x
- Sholkovitz E. R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquat. Geochem.* 1995;1:1–34. doi: 10.1007/BF01025229
- Skjelkvåle B. L., Bishop K., Laudon H., Wilander A., Yakovlev V. Effects on freshwater ecosystems. *AMAP Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme*. Oslo: Norway; 2007. 112 p.
- Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A., Denisov D., Cherepanov A., Siroezhko E. The hydrochemistry and recent sediment geochemistry of small lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia. *Water*. 2020;12(4):1130. doi: 10.3390/w12041130
- Slukovskii Z. I., Denisov D. B., Dauval'ter V. A., Zubova E. M., Myazin V. A., Guzeva A. V., Cherepanov A. A., Postevaya M. A., Val'kova S. A., Terent'ev P. M., Fokina N. V., Kosova A. L., Postnova S. V., Soshina A. S. Lakes of the city of Murmansk: hydrological, hydrochemical, and hydrobiological features. Apatity: KSC RAS; 2023. 174 p. (In Russ.)
- Slukovskii Z. I., Svetov S. A. Geochemical indicators of anthropogenic pollution in bottom sediments of small rivers in urbanized environments. *Geografiya*

i prirodnye resursy = *Geography and Natural Resources*. 2016;1:38–45. (In Russ.)

Slukovskii Z. Uranium in lake sediments of humid zone: A case study in the Southeast Fennoscandia (Karelia, Russia). *Water*. 2023;15(7):1360. doi: 10.3390/w15071360

Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Guzeva A. V., Udachin V. N. Uranium anomalies in recent sediments of lakes from the northern part of the Murmansk Region, Arctic. *Geochemistry International*. 2020;58(12):1374–1378. doi: 10.1134/S0016702920100134

Tang J., Johannesson K. H. Speciation of rare earth elements in natural terrestrial waters: assessing the role of dissolved organic matter from the modeling approach. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2003;67(13):2321–2339. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01413-8

Wright I. A., Davies P. J., Findlay S. J., Jonasson O. J. A new type of water pollution: concrete drainage infrastructure and geochemical contamination of urban waters. *Mar. Freshwater Res.* 2011;62(12):1355–1361. doi: 10.1071/MF10296

Xiao Y., Riise G. Coupling between increased lake color and iron in boreal lakes. *Sci. Total Environ.* 2021;767:145104. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145104

Xiao Y. H., Räsänen A., Hartikainen H., Vähätalo A. V. Iron as a source of color in river waters. *Sci. Total Environ.* 2015;536:914–923. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.092

Yanin E. P., Kuzmich V. N., Ivanitsky O. M. Regional natural inhomogeneity of the chemical composition of surface waters on land and the necessity of considering it in assessments of their ecological state and intensity of anthropogenic pollution. *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnkh resursov* = *Problems of Environmental Science and Natural Resources*. 2016;6:3–72. (In Russ.)

Yevtushenko N. Y., Dudnyk S. V., Rudyk-Leuska N. Y., Khyzhniak M. I. Factors determining the degree of heavy metals' toxicity to fish (a review). *Hydrobiol. J.* 2021;57(4):75–85. doi: 10.1615/HydrobJ.v57.i4.70

Zoller W. H., Gordon G. E., Gladney E. S., Jones A. G. The sources and distribution of vanadium in the atmosphere. *Trace Elements in the Environment*. Ch. 3. Washington: American Chemical Society; 1973. P. 31–47. doi: 10.1021/ba-1973-0123.ch003

Поступила в редакцию / received: 21.07.2024; принята к публикации / accepted: 25.10.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Постева Мария Алексеевна

младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии и рационального природопользования Арктики ИППЭС КНЦ РАН, старший преподаватель кафедры биологии и биоресурсов МАУ

e-mail: Postevaya.ma@yandex.ru

Даувальтер Владимир Андреевич

д-р геогр. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэкологии и рационального природопользования Арктики

e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

Слуковский Захар Иванович

канд. биол. наук, заведующий лабораторией геоэкологии и рационального природопользования Арктики

e-mail: slukovsky87@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Postevaya, Marina

Junior Researcher, INEP KSC RAS, Senior Lecturer at the Department of Biology and Bioresources, MAU

Dauvalter, Vladimir

Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Chief Researcher

Slukovskii, Zakhar

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

УДК 556.314 : 550.47

СУЛЬФАТРЕДУКЦИЯ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА БЕЛОЕ (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. Никольский, 20, Архангельск,
Россия, 163020), *ksyu_sev@mail.ru

Представлены результаты исследования сульфатредукции в воде и донных отложениях малого пресноводного озера Белое (Коношский район Архангельской области) за период с 2009 по 2017 год. Воды озера относятся к гидрокарбонатному типу кальциевой группы по классификации Алекина. В зимний период во все годы исследования отмечалось наличие анаэробных условий в воде оз. Белое вплоть до полного исчерпания кислорода по всему водному столбу. Несколько повышенные концентрации сульфатов в воде исследуемого водоема (до 30 мг/л) наблюдаются в зимний период. Данная обстановка повлияла на протекание сульфатредукции в воде и донных отложениях. Наблюдалась межсезонная и межгодовая изменчивость показателей сульфатредукции в озере. Максимально установленная концентрация сероводорода в воде в подледный период составляла 405 мкг/л (при ПДК_{рх} 5 мкг/л), а наибольшее количество соединений восстановленной серы (производных сероводорода) в донных отложениях – 7,33 % (в расчете на сухое вещество осадков), или 73 % от общего количества серы. В летний период в воде сероводород не был зафиксирован из-за аэрации водной толщи этого неглубокого водоема. На активность сульфатредукции в оз. Белое указывает и расход органического углерода: так, расход на образование соединений восстановленной серы составил в среднем 1,42 % по сравнению с расходом на восстановление железа – 0,14 %.

Ключевые слова: биогеохимические процессы; восстановление сульфатов; реакционноспособное железо; донные отложения; малые озера

Для цитирования: 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

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦКИА УрО РАН.

K. V. Titova*, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva. SULFATE REDUCTION IN WATER AND SEDIMENTS OF LAKE BELOYE (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

The article presents the results of a study of sulfate reduction in the water and sediments of a small freshwater Lake Beloye (Konoshsky district, Arkhangelsk region)

for the period from 2009 to 2017. The lake water belongs to the bicarbonate type of the calcium group according to Alekin's classification. In winter, anoxic conditions were observed in the water of Lake Beloye in all years of the study, up to total oxygen depletion throughout the water column. The slightly elevated concentrations of sulfates in the lake water (up to 30 mg/l) in winter are due to the inflow of water draining the underlying sulfate rocks. This situation affected the process of sulfate reduction both in the water and in sediments of the lake. Sulfate reduction indices showed interseasonal and interannual variations. The highest recorded concentration of hydrogen sulfide in water during the ice-covered period was 405 µg/l (the maximum permissible concentration for fisheries reservoirs being 5 µg/l), and the highest amount of reduced sulfur compounds (hydrogen sulfide derivatives) in sediments was 7.33 % (based on sediment dry matter) or 73 % of the total sulfur. No hydrogen sulfide was detected in water during the summer due to aeration of the water column of this shallow lake. The activity of sulfate reduction in Lake Beloye is also indicated by the consumption of organic carbon, which amounted to an average of 1.42 % for the formation of reduced sulfur compounds versus 0.14 % consumption for iron reduction.

Keywords: biogeochemical processes; sulfate reduction; reactive iron; sediments; small lakes

For citation: Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A. Sulfate reduction in water and sediments of Lake Beloye (Arkhangelsk Region). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 51–61. doi: 10.17076/lim1936

Funding. The study was carried out under state assignment to FCIAR UB RAS.

Введение

Формирование донных отложений озер происходит в результате сложного взаимодействия разнообразных природных процессов: климатических, гидрологических, физических, химических и биологических, протекающих во времени как на водосборной площади, так и в самом озере [Дауальтер, 2012]. Донные отложения неглубоких, небольших по площади слабопроточных водоемов характеризуются накоплением значительной органической составляющей. Летом озера хорошо прогреваются и в них интенсивно развивается жизнь. Летом и осенью при отмирании планктона пополняется органическое вещество (ОВ). В прибрежных участках донные отложения пополняются ОВ также за счет высшей растительности. В результате деятельности некоторых групп микроорганизмов ОВ в грунтах подвергаются деструкции и минерализации. В том случае, когда при стагнации в нижних слоях воды и донных отложениях создаются анаэробные условия, ОВ подвергается деструкции определенными видами бентосного микробного сообщества, в основном бродильщиками, сульфатредукторами и метаногенами. Преобладание того или иного процесса в деструкции определяется внутриводоемными особенностями, и в первую очередь наличием определенных доноров и акцепторов электронов

для разных видов конкурирующих анаэробных организмов. Сульфатредуцирующие бактерии представляют собой анаэробные микроорганизмы, которые повсеместно распространены в бескислородных местах обитания, где присутствуют сульфаты. В пресноводных средах с низким содержанием сульфатов эти бактерии играют важную роль в ферментации и анаэробном окислении органических соединений, при этом они могут использовать сульфаты в качестве конечного акцептора электронов, в результате чего образуется сероводород. Восстановление сульфата может происходить и при относительно низких концентрациях сульфатов, характерных для пресных вод [Lovley, 1983], так как пресноводные штаммы сульфатредуцирующих бактерий обладают высоким сродством к сульфатам [Ingvorsen et al., 1981; Ingvorsen, Jørgensen, 1984; Li et al., 1996]. Поэтому указанные бактерии также играют важную роль в пресноводных водоемах, благодаря активному циклу серы в них [Holmer, Storkholm, 2001; Muyzer, Stams, 2008].

Исследование процесса сульфатредукции в малых пресноводных озерах начато коллективом авторов в 2007 году. За это время полученные результаты показали, что данный процесс протекает в той или иной мере во всех изученных водоемах Архангельской области. Среди многих факторов, влияющих на процесс сульфатредукции и, как следствие, на характер

накопления восстановленных соединений серы, можно выделить следующие [Волков, 1984; Holmer, Storkholm, 2001]:

1) содержание сульфатов (акцепторы электронов);

2) количество ОВ и его качественный состав (доноры электронов);

3) содержание реакционноспособных форм железа, так как железо может связывать образующий сероводород, что приводит к образованию и накоплению сульфидных форм серы в донных отложениях.

Изучение восстановления сульфатов в воде и/или донных отложениях разнотипных водоемов проводилось как отечественными, так и зарубежными исследователями [Матвеев и др., 1990; Волков, Демидова, 2003; Кокрятская и др., 2003; Пашкаускас и др., 2005; Каллистова и др., 2006; Борзенко, Замана, 2008; Jørgensen, Parkes, 2010; Кревш, Кучинскене, 2012]. Однако в указанных работах почти не затрагивался вопрос анаэробной минерализации ОВ в пресноводных маломинерализованных водоемах, подверженных антропогенному влиянию без прямого воздействия промышленных предприятий. Сульфатредукция в пресноводных озерах также редко становилась предметом лимнологических исследований, при этом даже при минимально обнаруживаемых концентрациях сульфатов этот процесс имел место [Li et al., 1996; Holmer, Storkholm, 2001].

Авторами работы ранее были исследованы маломинерализованные озера, в которых сульфатредукция протекала довольно активно (оз. Светлое, Нижнее, Масельское) [Титова, Кокрятская, 2013; Кокрятская и др., 2019; Титова и др., 2019]. При этом выделены водоемы, в которых фактором, сдерживающим интенсивное протекание процесса, выступали низкие концентрации сульфатов и недостаточное количество доступных для сульфатредуцирующих бактерий низкомолекулярных органических соединений [Титова, Кокрятская, 2014, 2018; Титова и др., 2023].

Целью настоящих исследований являлось изучение изменения активности процесса сульфатредукции в воде и донных отложениях малого пресноводного озера с повышенным содержанием сульфатов по накоплению соединений восстановленной серы в период с 2009 по 2017 год.

Материалы и методы

Лимнологические исследования проводились на территории Коношского района Архангельской области. По стратиграфической

шкале слоев пород на территории Коношского района выделяют казанский ярус пермской системы P_2kz (270 млн лет назад), представленный карбонатными породами, в частности известняками. В состав четвертичных отложений на территории района входят ледниковые, водно-ледниковые, аллювиальные и болотные отложения от нижнечетвертичных до современных. Суммарная мощность отложений на некоторых участках достигает 100 м и определяется главным образом рельефом поверхности дочетвертичных пород [Атлас..., 1976].

Коношский район находится на древней (дорифейской) Русской (Восточно-Европейской) платформе. В геоморфологическом отношении территория района лежит в юго-западной части Онего-Двинско-Мезенской равнины. Рельеф района сложился в результате деятельности ледников в четвертичный период (около 1 млн лет назад). Сточки зрения геоморфологии преобладающими типами рельефа на данной местности являются плоская и волнистая моренная и озерно-ледниковая равнины, местами ледниковый и холмисто-грядовый моренный рельеф. Из моренных холмов и гряд сложена и Коношско-Няндомская возвышенность, которая тянется с юга на север со средней высотой 160 м. К востоку местность повышается. Наибольшая высота составляет 244 м над уровнем моря [Атлас..., 1976; Схема..., 2013]. Территория района расположена на водоразделе трех больших рек – Северной Двины, Онеги и Кубены. Водораздел между водосборами Онеги и Северной Двины (бассейн Белого моря) проходит в пгт Коноша [Схема..., 2013].

Почвенный покров территории представлен сильноподзолистыми почвами и подзолами, местами торфянисто-подзолисто-глеевыми, сформированными на суглинистой карбонатной морене [Атлас..., 1976].

Рельеф применительно к грунтовому водоносному комплексу определяет всю гидродинамическую обстановку: приуроченность областей преимущественной инфильтрации атмосферных осадков к водораздельным участкам; движение в направлении к долинам рек и котловинам озер, являющимся областями дренирования вод. Согласно гидрогеологическому районированию территория района приурочена к Северодвинскому артезианскому бассейну, подземные воды в разной степени распространены во всех генетических типах четвертичных отложений и в дочетвертичных породах. Воды типа «верховодки» содержатся в отложениях болотного и озерного генезиса, а также в песчаных линзах, развитых на ледниковых отложениях с поверхности,

и создают условия для широкого заболачивания местности. Водоносный горизонт верхне-казанских отложений приурочен к известнякам различной степени кавернозности и трещиноватости, развитых повсеместно с глубины 70–100 м [Схема..., 2013]. Мощность зоны пресных подземных вод на территории Коношского района преимущественно около 100 м, в долинах рек – около 50 м и местами до 25 м. В настоящее время эксплуатация водоносных комплексов осуществляется шахтными колодцами глубиной 5–20 м и скважинами глубиной от 40 до 70 м, реже до 100 м. Углубление скважин ниже указанных глубин не рекомендуется, так как снизу могут поступать воды с повышенной минерализацией и высокой жесткостью. Подземные воды на территории Коношского района пресные, гидрокарбонатные кальциевые. В неглубоких колонках и колодцах концентрация сульфатов не превышает 10 мг/л. В ряде скважин данной территории на глубине 100–140 м водовмещающие породы представлены гипсами, доломитами, ангидритами. Воды приобретают другой состав, а содержание сульфатов в них может увеличиваться до 1000 мг/л [Подземные..., 1968].

В областях с гумидным климатом, к которым относится и данная территория, влияние рельефа на химический состав грунтовых вод сказывается через гидродинамические и гидрогеологические показатели; так, сильная расчлененность рельефа обуславливает короткие пути фильтрации и высокую степень возобновляемости грунтовых вод, а это приводит к удалению из пород хорошо растворимых

веществ и поступление их в котловины озер [Схема..., 2013].

Объект исследования – оз. Белое, находится недалеко от д. Климовская Коношского района Архангельской области (рис. 1). Озеро относится к категории малых водоемов с площадью водного зеркала менее 1 км²: длина около 1,30 км, ширина – 0,22 км. Расположено на высоте 132 абс. м. Среднее озеро в системе Глубокое→Белое→Назаровское, соединено протоками с соседними водоемами.

По протеканию продукционно-деструкционных процессов, содержанию биогенных элементов показано, что на момент начала исследований на функционирование экосистемы оз. Белое оказывают воздействие только природные факторы, прямого антропогенного влияния не обнаружено [Широкова и др., 2008].

Глубоководные участки озера выделяли по результатам батиметрической съемки. Наибольшая глубина водоема не превышала 2,5 м.

Образцы донных отложений отбирались согласно требованиям [ГОСТ 17.1.5.01-80] в марте и июле 2009–2017 гг. на участке с максимальной глубиной, находящемся примерно посередине озера, в зимний период – со льда, в летний – с использованием лодки. Применялась гравитационная трубка диаметром 60 мм, погружающаяся в осадок до 1 м под действием собственного веса или специальных утяжеляющих грузов. Мощность отобранных отложений не превышала 50 см. Колонка осадков делилась сразу после отбора на слои по 5 см. Воды отбиралось не менее 3 образцов за сезон, донных отложений (слоев) – от 5 до 10 за сезон.

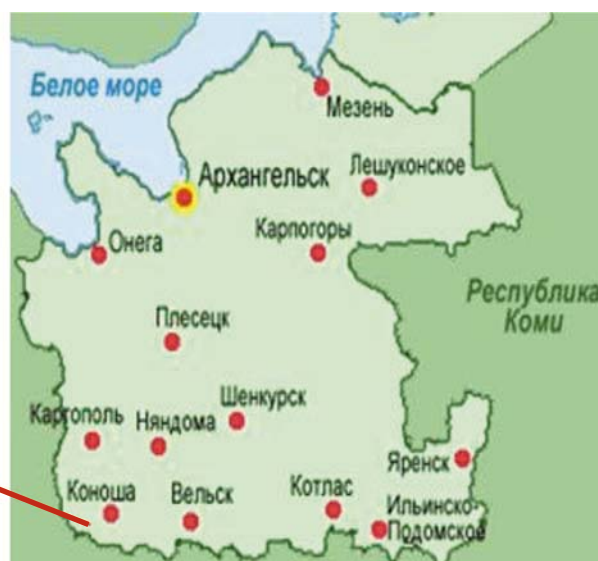
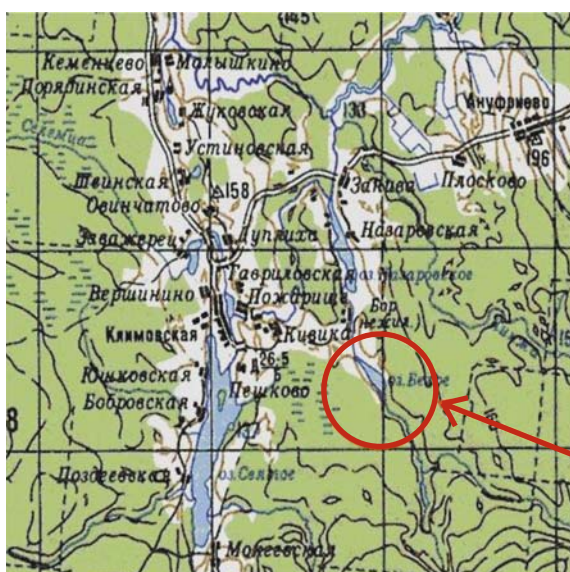


Рис. 1. Расположение объекта исследования

Fig. 1. Location of the study object

Определение органического углерода и азота проводили методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на CHN-анализаторе фирмы «Hewlett-Packard» [Гельман и др., 1987]. Разделение продуктов пиролиза проводили на медной колонке, заполненной Порапаком-Q, с последующим детектированием по теплопроводности. Расчет процентного содержания органического углерода и органического азота в анализируемой пробе проводили с использованием градуировочных коэффициентов стандартных образцов.

Измерение растворенного в воде кислорода осуществлялось портативным оксиметром HQ30D.99 (Hach Lange) с люминесцентным датчиком начиная с 2014 года, до этого его содержание устанавливали скляночным методом Винклера. Отбор проб воды осуществлялся в соответствии с [ГОСТ 31861-2012], определение главных ионов, в том числе сульфатов – по [ПНД Ф 14.1:2:4.132-98].

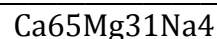
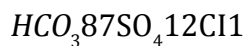
Определение различных форм серы проводили по методике систематического фазового анализа, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Волков, Жабина, 1980]. Методика предусматривает определение сульфидной (кислоторастворимой), элементной, пиритной и органической форм серы из одной навески донных осадков. Расчет проводился на абсолютно сухое вещество. Определение реакционноспособных форм Fe^{2+} и Fe^{3+} проводили после извлечения их из осадка 3,5 N серной кислотой. Fe(III) определяли из аликвоты раствора титрованием 0,01 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ выделившегося I_2 после взаимодействия KI с Fe^{3+} . Fe(II) – из другой аликвоты титрованием 0,01 N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Содержание сульфидного железа рассчитывали по данным для сульфидной серы, исходя из формулы FeS ; пиритное железо – по содержанию пиритной серы. Содержание реакционноспособного железа ($\text{Fe}_{\text{реакц}}$) получали в результате сложения вышеперечисленных форм [Соколов, 1980]: $\text{Fe}_{\text{реакц}} = \text{Fe(II)} + \text{Fe(III)} + \text{Fe}_{\text{сульфид}} + \text{Fe}_{\text{пирит}}$.

Результаты и обсуждение

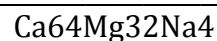
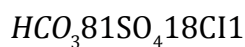
Гидрохимические показатели

Минерализация воды оз. Белое в среднем составляла 160 мг/л, то есть данный водоем относится к категории ультрапресных. Показатель изменялся по сезонам (мг/л): зимой – 175 (161–200), летом – 153 (151–156); от поверхности ко дну наблюдалось увеличение солесодержания. Гидрохимический состав отражен в формулах:

Март: М 175; Ж 2,60; pH 6,0



Июль: М 153; Ж 1,71; pH 7,2



По распределению главных ионов вода оз. Белое относится к гидрокарбонатному классу группы кальция. В зимний период концентрации основных ионов, за исключением сульфатов, были выше летних. Концентрации хлоридов и натрия мало изменялись по сезонам. Заметно увеличение от поверхности ко дну концентраций гидрокарбонатов (от 180 до 230 мг/л), сульфатов (от 13 до 30 мг/л) и кальция (от 23 до 30 мг/л). Существенным было различие в жесткости воды: в среднем 2,65 ммоль/л в марте и 1,5 ммоль/л в июле. Содержание сульфатов в среднем составляло 13 мг/л зимой и 19 мг/л летом. Отмеченный максимум в придонных слоях – 30 мг/л. Для сравнения, в водах озер Кенозерского национального парка концентрация сульфатов составляет около 1 мг/л [Титова и др., 2018, 2023], озер Коношского района – 3,8 (оз. Святое) и 4,1 (оз. Нижнее) мг/л [Титова, Кокрятская, 2014].

В марте в воде оз. Белое наблюдалось исчерпание кислорода по всему водному столбу. В июле в разные годы содержание кислорода отличалось: в поверхностных слоях оно составляло 8–9 мг/л и постепенно снижалось в придонном слое до 2–3 мг/л. Полного исчерпания кислорода летом не наблюдалось из-за ветрового перемешивания водных масс этого мелководного водоема.

Зависимое от содержания кислорода и ОВ количество сероводорода также имело сезонные различия (мкг/л): зимой – 227 (от 160 до 405), летом – 6 (от 2 до 10). При этом концентрации органического углерода по сезонам отличались не столь значительно (мг/л): зимой – 18,66, уменьшаясь от поверхности ко дну с 18,85 до 18,57; летом – 17,88, увеличиваясь ко дну от 17,28 до 17,93.

Цветность воды зимой была выше, чем летом: 73,3 и 62,3 градуса соответственно. В марте ее изменение не носило согласованного характера с содержанием органического углерода, а летом взаимосвязь этих параметров была значима. В зимнюю межень в значение цветности воды ощутим вклад растворенного железа (в среднем его концентрация достигала 880 мкг/л), летом же из-за наличия

кислорода по всему водному столбу практически все растворенное железо (остаточное количество около 50 мкг/л) окислилось и в результате седиментации малорастворимых его соединений поступило в донные отложения.

Стоит отметить, что в исследуемые периоды практически не проявились сезонные различия в концентрации в воде озера взвешенных веществ (мг/л): 1,48 (1,43–1,65) в марте и 1,75 (1,64–1,90) в июле. В придонном горизонте они закономерно возрастали.

В зимний период углерод ($C_{орг}$) и азот ($N_{орг}$) имели тенденцию к снижению по водному столбу ($C_{орг}$ и $N_{орг}$ соответственно): 44 и 6 % в поверхностном слое → 36 и 2 % в среднем → 32 и 15 % в придонном слое, что свидетельствует о деструкции растворенного и взвешенного ОВ. Содержание ОВ в водорослях на сухое вещество составляло 30–32 % $C_{орг}$, $N_{орг}$ – 2 %. Это указывает на тот факт, что при отмирании водорослей ОВ в их составе также может вносить в донные отложения значительный вклад.

Донные отложения

Донные отложения озера представлены темно-коричневыми илами, верхний слой которых содержит слаборазложившиеся растительные остатки. Влажность осадков варьировала от 76 до 99 % (в среднем 88 %) и практически не отличалась по сезонам.

Донные отложения содержали в среднем $12,32 \pm 5,48$ % ОВ в пересчете на $C_{орг}$. Верхние слои отложений (глубиной до 15 см) можно отнести к категории сапропелей (ОВ более 15 %) [Косов, 2008]. Содержание органического углерода незначительно отличалось по сезонам

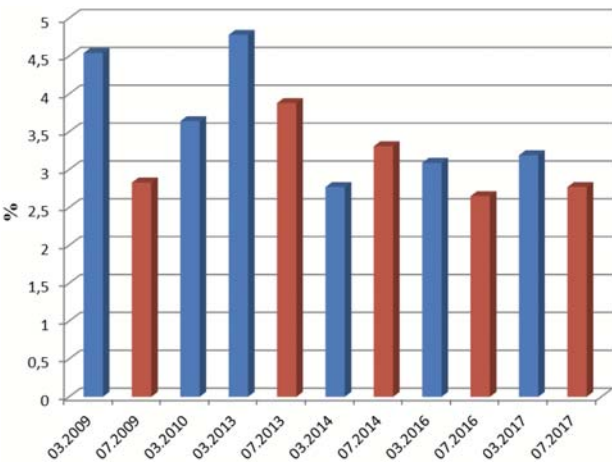


Рис. 2. Общее содержание серы в донных отложениях оз. Белое по сезонам

Fig. 2. Total sulfur content in the bottom sediments of Lake Beloye by seasons

исследования: март – $13,16 \pm 6,02$ %, июль – $12,28 \pm 4,76$ %. В поверхностном 0–5-см слое отложений его содержание было на 1–4 % ниже, чем на глубине 5–10 см.

Остаточное лабильное органическое вещество ($C_{лаб}$) было определено в слое 0–5 см по остатку $C_{орг}$ после экстракции образца 0,5 % H_2SO_4 в течение 2 часов на водяной бане [Rovira, Vallejo, 2002] (табл.).

Остаточное лабильное ОВ (%) в донных отложениях оз. Белое

Residual labile organic matter (%) in the bottom sediments of Lake Beloye

Сезон Season	$C_{лаб}$ C_{lab}	$C_{лаб}$ от $C_{орг}$ C_{lab} from $C_{орг}$
Март / March 2016	4,51	65
Июль / July 2016	12,49	72
Март / March 2017	18,50	70
Июль / July 2017	7,65	43

Содержание соединений восстановленной серы (ΣSH_2S) (кислоторастворимые сульфиды, элементная, пиритная и органическая сера) [Волков, 1984] в среднем за все время наблюдений составляло около 47 % от общего ее количества в донных отложениях, или в среднем 1,90 % в расчете на сухое вещество осадка, в том числе 1,60 % зимой, 2,09 % летом.

Изменения этого показателя в межгодовом и межсезонном аспекте были значительны (рис. 3). В зимний период содержание ΣSH_2S было в среднем несколько выше, чем в летний. При этом вклад был больше летом – 48 и 66 % зимой и летом соответственно. Исключение составил летний период 2014 года, когда наблюдалась противоположная тенденция.

В содержание восстановленной серы за весь период исследования основной вклад (90–95 %) вносили сера пирита и органических соединений. В зимний период 2009, 2010, 2014 и 2017 годов соотношение этих форм было примерно 1:1. В марте 2013 и 2016 годов преимущественным был вклад пиритной серы (около 70 %). В июле во все годы исследования доминировала только пиритная сера (до 80 %), лишь в июле 2014 года пиритной и органической серы было примерно по 50 %, с небольшим перевесом в пользу первой. Максимальное количество серы пирита отмечено в марте 2009 (7,60 %) и 2013 (7,94 %) годов; летом эти величины были несколько меньше и приходились на те же годы исследований – 5,22 и 4,06 % соответственно.

Как видно из данных рис. 4, накопление соединений восстановленной серы в оба сезона исследований связано со снижением концентрации сульфатной серы, что связано с протеканием процесса сульфатредукции. Об активности и постоянстве восстановления сульфатов свидетельствует тот факт, что в пресноводном антропогенно ненагруженном озере в донных отложениях фиксируется наличие в значительных количествах пиритной серы как результата взаимодействия элементарной серы (появляется в процессе окисления образующегося сероводорода) с кислоторастворимыми сульфидами (результат взаимодействия образующегося сероводорода с металлами, в основном с железом). Для других исследованных авторами пресноводных озер на материковой территории Архангельской области содержание этой формы серы и ее вклад в общее количество восстановленной серы были невелики [Титова, Кокрятская, 2013, 2014; Титова и др., 2017].

Содержание реакционноспособного железа в донных отложениях оз. Белое составляло в среднем 2,09 %. Железо в большей степени находилось в составе пирита – около 45 % от общего содержания $Fe_{реакц}$, далее – в составе оксидов и гидроксидов железа, фосфатов (III) – около 36 %, в виде карбонатов – 18 %, и небольшой вклад вносило сульфидное железо – около 1 %. Минимальное количество отмечено в оба сезона исследований в отложениях, залегающих на глубине 50 см и более – 0,46 %, что связано со снижением содержания и окисленной, и восстановленной его форм.

Максимальные концентрации $Fe_{реакц}$ зафиксированы в зимний период 2009 года в подповерхностном горизонте отложений – 12,52 %, а также в летний период 2013 года в поверхностном горизонте осадков – 11,36 %. При этом наблюдалось разное распределение форм железа (рис. 5). В зимний период чуть больше половины железа было в составе пирита,

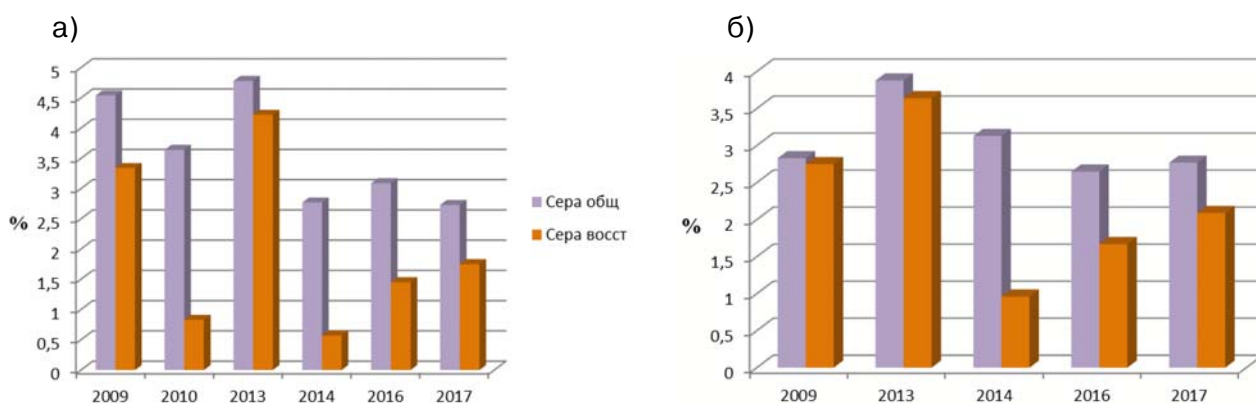


Рис. 3. Содержание общей и восстановленной серы в донных отложениях оз. Белое по сезонам: а) март, б) июль

Fig. 3. Total and reduced sulfur content in the bottom sediments of Lake Beloye by seasons: а) March, б) July

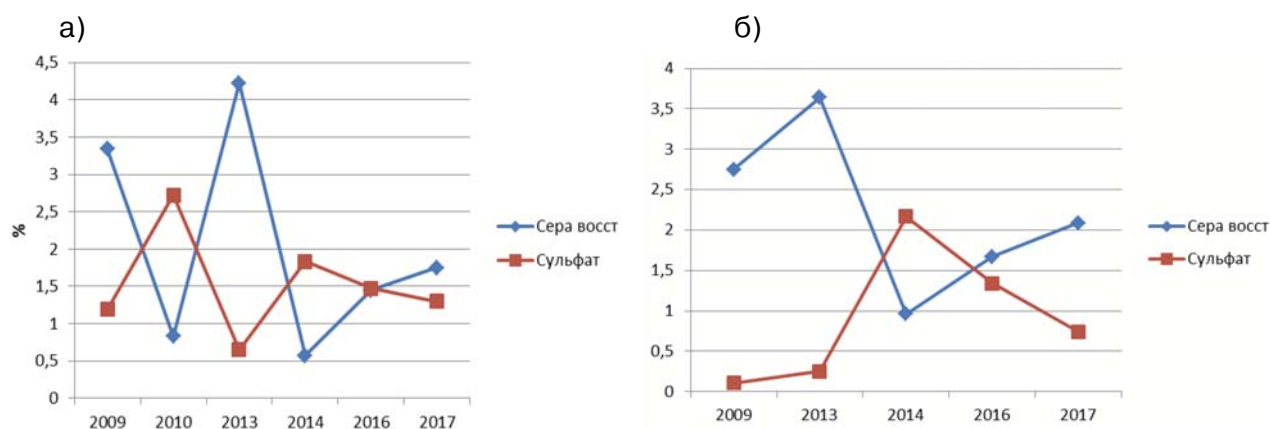


Рис. 4. Содержание восстановленной и сульфатной серы в донных отложениях оз. Белое по сезонам: а) март; б) июль

Fig. 4. Reduced and sulfate sulfur content in the bottom sediments of Lake Beloye by seasons: а) March; б) July

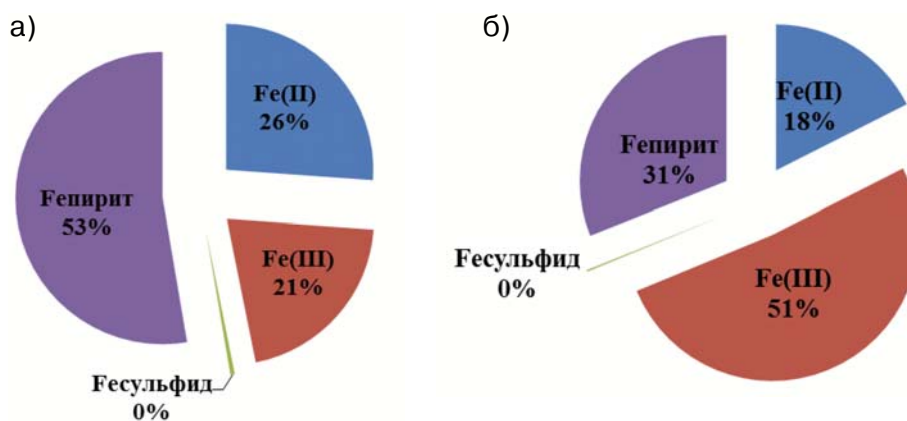


Рис. 5. Распределение форм реакционноспособного железа в донных отложениях оз. Белое: а) март 2009; б) июль 2013

Fig. 5. Distribution of reactive iron forms in the bottom sediments of Lake Beloye: а) March 2009; б) July 2013

с небольшой разницей вносили вклад остальные соединения железа – (II) и (III) (рис. 5, а). Летом картина была несколько иной. Больше половины железа находилось в составе отложений в виде Fe (III), что связано с его окислением в условиях перемешивания водной толщи до дна вследствие небольшой глубины озера. В оба сезона практически отсутствовало железо в составе кислоторастворимых сульфидов.

С использованием балансовых уравнений [Страхов, 1976] вычислен расход органического углерода на восстановление железа и серы. На первый процесс в донных отложениях оз. Белое в среднем было затрачено 0,14 % C_{org} , во втором случае – 1,42 % C_{org} на сухое вещество осадков.

Заключение

Проведенные исследования показали, что в малом неглубоком пресноводном оз. Белое могут складываться благоприятные условия для протекания восстановительных процессов. Причиной образования анаэробных условий в подледный период являлась деструкция органического вещества, поступающего в водоем с водосбора и продуцируемого в нем.

Несмотря на гидрокарбонатно-кальциевый тип вод в изученном озере, в них существенен вклад сульфатов и кальция. Активизация сульфатредукции была отмечена как в водной толще водоема по количеству определенного сероводорода, так и в донных отложениях по количеству и распределению форм восстановленной серы.

В донных осадках оз. Белое восстановленная форма железа была доминирующей

(в среднем 75 % от общего количества реакционноспособного железа и в большей степени связанного в пирит), а соединения восстановленной серы вносили вклад, составляющий меньше половины от общего содержания серы в отложениях. При этом расход органического углерода на образование соединений восстановленной серы был намного выше, чем на восстановление железа.

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.

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

Литература

- Атлас Архангельской области / Отв. ред. Н. А. Моргунова. М.: ГУГК, 1976. 72 с.
- Борзенко С. В., Замана Л. В. Сульфатредукция как фактор формирования содовых вод озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Вестник Томского государственного университета. 2008. № 7. С. 188–193.
- Волков И. И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Волков И. И., Демидова Т. П. Соединения восстановленной неорганической серы в водах Балтийского моря // Океанология. 2003. Т. 43, № 6. С. 855–861.
- Волков И. И., Жабина Н. Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // Химический анализ морских осадков. М.: Наука, 1980. С. 5–27.

- Гельман Н. Э., Терентьева Н. А., Шанина Т. М. Методы количественного органического элементного микроанализа. М.: Химия, 1987. 296 с.
- ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Введен 1982-01-01. Переиздан 2015-04-06.
- ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. Введен 2014-01-01.
- Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.
- Каллистова А. Ю., Кевбрина М. В., Пименов Н. В., Русанов И. И., Рогозин Д. Ю., Верли Б., Ножевникова А. Н. Сульфатредукция и метаногенез в меромиктических озерах Ширы и Шунет (Хакасия) // Микробиология. 2006. Т. 75, № 6. С. 828–835.
- 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., Чулаков А. В., Титова К. В., Чулакова А. А., Забелина С. А., Морева О. Ю., Неверова Н. В., Жибарева Т. А. Гидролого-гидрохимические характеристики меромиктического железомарганцевого пресноводного озера Светлое (Архангельская область) // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биология. 2019. Т. 12, № 2. С. 147–159. doi: 10.17516/1997-1389-0036
- Косов В. И. Сапропель. Ресурсы, технологии, геоэкология. СПб.: Наука, 2007. 224 с.
- Кревш А., Кучинскене А. Микробная деструкция органического вещества в донных осадках малых озер урбанизированного ландшафта (Литва) // Микробиология. 2012. Т. 81, № 4. С. 517–523.
- Матвеев А. А., Кучинскене А. А., Резников С. А. Об интенсивности процесса сульфатредукции в донных отложениях Ладожского озера // Гидрохимические материалы. Т. CVIII. Л.: Гидрометеиздат, 1990. С. 153–157.
- Пашкаускас Р., Кучинскене А., Жвикас А. Сульфатредуцирующие бактерии в озерах гипсового карста на севере Литвы // Микробиология. 2005. Т. 74, № 6. С. 823–830.
- ПНД Ф 14.1:2:4.132-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. Введен 1998-04-02. Переиздан 2008-01-01.
- Подземные воды СССР. Обзор подземных вод Архангельской области. Гидрогеологический очерк. Т. I. М., 1968. 421 с.
- 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.
- Схема территориального планирования Коношского муниципального района Архангельской области. СПб., 2013. 138 с.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А. Процесс сульфатредукции в пресноводных озерах (Белое, Нижнее, Святое) Коношского района Архангельской области // Вестник МГОУ. 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., 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., Попов С. С., Морева О. Ю., Брагин А. В. Изучение процесса сульфатредукции в воде озер на территории национального парка «Кенозерский» // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 53–65. doi: 10.17076/lim1744
- Титова К. В., Кокрятская Н. М. Соединения серы в воде и донных осадках малых озер юго-запада Архангельской области // Вестник Московского государственного областного университета. Естественные науки. 2013. № 2. С. 101–105.
- 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.
- Широкова Л. С., Воробьева Т. Я., Забелина С. А., Морева О. Ю., Климов С. И. Характеристика продукционно-деструкционных процессов малых озер Архангельской области // Современные проблемы науки и образования. 2008. № 5. С. 17–24.
- Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review // Freshwat. Biol. 2001. Vol. 46, no. 4. P. 431–451.
- Ingvorsen K., Jørgensen B. B. Kinetics of sulphate uptake by freshwater and marine species of *Desulfovibrio* // Arch. Microbiol. 1984. Vol. 139. P. 61–66.
- Ingvorsen K., Zeikus J. G., Brock T. D. Dynamics of bacterial sulfate reduction in a eutrophic lake // Appl. Environ. Microbiol. 1981. Vol. 42, no. 6. P. 1029–1036.
- Jørgensen B. B., Parkes R. J. Role of sulfate reduction and methane production by organic carbon degradation in eutrophic fjord sediments (Limfjorden, Denmark) // Limnol. Oceanogr. 2010. Vol. 55(3). P. 1338–1352.
- Li J. H., Takii S., Kotakemori R., Hayashi H. Sulfate reduction in profundal sediments in Lake Kizaki, Japan // Hydrobiologia. 1996. Vol. 33. P. 201–208.
- Lovley D. R., Klug M. J. Sulfate reducers can outcompete methanogens at freshwater sulfate concentrations // Appl. Environ. Microbiol. 1983. Vol. 45. P. 187–192.
- Muyzer G., Stams A. J. M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria // Nature Reviews Microbiology. 2008. No. 6. P. 441–454.
- Rovira P., Vallejo V. R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach // Geoderma. 2002. Vol. 107. P. 109–141.

References

- Borzenko S. V., Zamana L. V. Sulfate reduction as a factor in the formation of soda waters of Lake Doroninskoye (eastern Transbaikalia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tomsk State University*. 2008;7:188–193. (In Russ.)
- Dauval'ter V. A. Geocology of bottom sediments. Murmansk: MGTU; 2012. 242 p. (In Russ.)
- Gel'man N. E., Terent'eva N. A., Shanina T. M. Methods of quantitative organic elemental microanalysis. Moscow: Khimiya; 1987. 296 p. (In Russ.)
- GOST 17.1.5.01-80. Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis. Introduced on 01.01.1982. Reissued on 04.06.2015. Moscow: IPK Standard publishing house; 2002. 5 p. (In Russ.)
- GOST 31861-2012. Water. General requirements for sampling. Introduced on 01.01.2014. Moscow: Standartinform; 2013. 36 p. (In Russ.)
- Groundwater in the USSR. A review of groundwater in the Arkhangelsk Region. Hydrogeological essay. Vol. I. Moscow; 1968. 421 p. (In Russ.)
- Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwat. Biol.* 2001;46(4):431–451.
- Ingvorsen K., Jørgensen B. B. Kinetics of sulphate uptake by freshwater and marine species of *Desulfovibrio*. *Arch. Microbiol.* 1984;139:61–66.
- Ingvorsen K., Zeikus J. G., Brock T. D. Dynamics of bacterial sulfate reduction in a eutrophic lake. *Appl. Environ. Microbiol.* 1981;42(6):1029–1036.
- Jørgensen B. B., Parkes R. J. Role of sulfate reduction and methane production by organic carbon degradation in eutrophic fjord sediments (Limfjorden, Denmark). *Limnol. Oceanogr.* 2010;55(3):1338–1352.
- Kallistova A. Yu., Kevbrina M. V., Pimenov N. V., Rusanov I. I., Rogozin D. Yu., Verli B., Nozhevnikova A. N. Sulfate reduction and methanogenesis in meromictic Lakes Shira and Shunet (Khakassia). *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2006;75(6):828–835. (In Russ.)
- Kokryatskaya N. M., Chupakov A. V., Titova K. V., Chupakova A. A., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Neverova N. V., Zhibareva T. A. Hydrological and hydrochemical characteristics of the meromictic iron-manganese freshwater Lake Svetloe (Arkhangelsk Region). *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Biologiya = Journal of the Siberian Federal University. Biology Series*. 2019;12(2):147–159. (In Russ.). doi: 10.17516/1997-1389-0036
- Kokryatskaya N. M., Volkov I. I., Demidova T. P., Murzina T. S. Sulfur compounds and reactive iron in bottom sediments of the Northern Dvina estuary. *Aktual'nye problemy okeanologii = Topical issues of oceanology*. Moscow: Nauka; 2003. P. 475–494. (In Russ.)
- Kosov V. I. Sapropel. Resources, technologies, geocology. St. Petersburg: Nauka; 2007. 224 p. (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.)
- Li J. H., Takii S., Kotakemori R., Hayashi H. Sulfate reduction in profundal sediments in Lake Kizaki, Japan. *Hydrobiologia*. 1996;33:201–208.
- Lovley D. R., Klug M. J. Sulfate reducers can out-compete methanogens at freshwater sulfate concentrations. *Appl. Environ. Microbiol.* 1983;45:187–192.
- Matveev A. A., Kuchinskene A. A., Reznikov S. A. On the intensity of the sulfate reduction process in the bottom sediments of Lake Ladoga. *Gidrokhimicheskie materialy = Hydrochemical materials*. 1990;CVIII: 153–157. (In Russ.)
- Morgunova N. A. (ed.). Atlas of the Arkhangelsk Region. Moscow: GUGK; 1976. 72 p. (In Russ.)
- Muyzer G., Stams A. J. M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nat. Rev. Microbiol.* 2008;6:441–454.
- Pashkauskas R., Kuchinskene A., Zhvikas A. Sulphate-reducing bacteria in gypsum karst lakes in northern Lithuania. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2005;74(6):823–830. (In Russ.)
- PND F 14.1:2.4.132-98. Quantitative chemical analysis of waters. Methodology for measuring the mass concentration of anions: nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate and phosphate in samples of natural drink and waste water by ion chromatography. Introduced 04.02.1998. Reissued 01.01.2008. (In Russ.)
- Rovira P., Vallejo V. R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma*. 2002;107:109–141.
- Scheme of the territorial planning of the Konosha Municipal District in the Arkhangelsk Region. St. Petersburg; 2013. 138 p. (In Russ.)
- Shirokova L. S., Vorob'eva T. Ya., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Klimov S. I. Characterization of production/mineralization processes in small lakes of the Arkhangelsk Region. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2008;5:17–24. (In Russ.)
- Sokolov V. S. Determination of reactive forms of iron and manganese in marine sediments. *Khimicheskii analiz morskikh osadkov = 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.)
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Popov S. S., Moreva O. Yu., Bragin A. V. Studying the process of sulfate reduction in the water of lakes in the Kenozersky National Park. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023;6:53–65. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1744
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Sulfate reduction in bottom sediments of Lake Svyatloe (south of the Arkhangelsk Region). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the 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. Sulfur compounds in water and bottom sediments of small lakes in the southwest of the Arkhangelsk Region. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Estestvennye nauki = Bulletin of the Moscow State Regional University. Natural Science Series*. 2013;2: 101–105. (In Russ.)

Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A. The process of sulfate reduction in freshwater lakes (Beloye, Nizhnee, Svyatoye) of the Konosha District of the Arkhangelsk Region. *Vestnik MGOU. Estestvennye nauki = Bulletin of Moscow State Regional University. Series: 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 Nazarovskoe (Arkhangelsk Region). *Principles of Ecology*. 2019;8,4:69–80. (In Russ.). doi: 10.15393/j1.art.2019.8722

Volkov I. I., Demidova T. P. Compounds of reduced inorganic sulfur in the waters of the Baltic Sea. *Okeanologiya = Oceanology*. 2003;43(6):855–861. (In Russ.)

Volkov I. I. Geochemistry of sulfur in ocean sediments. Moscow: Nauka; 1984. 272 p. (In Russ.)

Volkov I. I., Zhabina N. N. Methods for determining various sulfur compounds in marine sediments. *Khimicheskii analiz morskikh osadkov = Chemical analysis of marine sediments*. Moscow: Nauka; 1980. P. 5–27. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 16.10.2024; принята к публикации / accepted: 14.01.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

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.-минер. 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. (Geogr.), Senior Researcher

Kokryatskaya, Natalia

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

Zhibareva, Tatiana

Junior Researcher

УДК 551.89

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА ЧУДЕСНАЯ ЛАМБА (ЗАПОВЕДНИК «КИВАЧ»)

М. С. Потахин¹, Н. А. Белкина¹, М. С. Богданова¹, Н. А. Мясникова¹,
И. В. Морозова¹, Е. В. Гатальская¹, А. В. Орлов^{1,2}, А. В. Пронина^{1*}

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*anastasiya.2802@mail.ru

² Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
(наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186)

Одной из причин потепления климата, наблюдаемого в последние десятилетия, является увеличение в атмосфере концентрации парниковых газов. Среди них ведущая роль принадлежит CO₂, посредством которого осуществляется перенос углерода между различными резервуарами планеты (литосфера, биосфера, атмосфера, гидросфера). Наземные водные экосистемы одновременно являются приемниками, преобразователями, накопителями и экспортерами терригенного и атмосферного углерода. Оценить аккумулирующую способность озера по отношению к углероду и ее изменения на разных этапах развития экосистемы водоема можно на основе изучения кернов донных отложений. В статье представлены результаты исследования донных отложений озера Чудесная ламба (заповедник «Кивач») и выявлены особенности накопления C_{орг}. По результатам литологического, гранулометрического и геохимического состава образцов были выделены три горизонта в разрезе донных отложений, которые свидетельствуют о последовательной смене седиментационных обстановок в истории озера, произошедших при изменении климата и накоплении минерального, органо-минерального и органогенного осадочного вещества. Горизонт I (7,50–7,33 м) представлен донными отложениями, накопленными в период Онежского приледникового озера, они имеют минеральный характер. Горизонт II (7,33–7,26 м) – осадки, формировавшиеся в период климатических изменений после изоляции озера от Онежского приледникового озера, отличаются значительным градиентом концентраций органического вещества. Горизонт III (7,26–7,10 м) формировался в голоцене, в это время водоем становится накопителем органического вещества. Полученная информация о содержании и особенностях накопления органического вещества в донных отложениях озера Чудесная ламба вместе с использованием балансовой модели потоков органического вещества в трофических сетях позволят рассчитать баланс углерода в экосистеме модельного водоема и разработать прогнозные оценки потоков CO₂ с поверхности воды в зависимости от химического состава воды и географического положения водоема.

Ключевые слова: водные экосистемы; донные отложения озер; баланс углерода; реконструкция накопления органического вещества

Для цитирования: Потахин М. С., Белкина Н. А., Богданова М. С., Мясникова Н. А., Морозова И. В., Гатальская Е. В., Орлов А. В., Пронина А. В. Особенности накопления органического вещества в донных отложениях озера Чудесная ламба (заповедник «Кивач») // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 62–73. doi: 10.17076/lim2028

Финансирование. Исследование выполнено в рамках ВПГ ГЗ «Российская система климатического мониторинга».

**M. S. Potakhin¹, N. A. Belkina¹, M. S. Bogdanova¹, N. A. Myasnikova¹, I. V. Morozova¹, E. V. Gatal'skaya¹, A. V. Orlov^{1,2}, A. V. Pronina^{1*}.
SPECIFIC FEATURES OF ORGANIC MATTER ACCUMULATION IN BOTTOM
SEDIMENTS OF LAKE CHUDESNAYA LAMBA (KIVACH NATURE RESERVE)**

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *anastasiya.2802@mail.ru

² Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Moika River Emb., 191186 St. Petersburg, Russia)

One of the causes of climate warming observed in recent decades is the increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, where the leading role is played by CO₂, through which carbon is transferred between different reservoirs of the planet (lithosphere, biosphere, atmosphere, hydrosphere). Terrestrial aquatic ecosystems are simultaneously receivers, converters, accumulators and exporters of terrigenous and atmospheric carbon. It is possible to estimate the accumulating capacity of a lake in relation to carbon and its changes at different stages of the water body ecosystem development on the basis of the study of bottom sediment cores. The article presents the results of a study of bottom sediments of Lake Chudesnaya Lamba (Kivach Nature Reserve) and reveals the specific patterns of total organic carbon accumulation. Based on the lithological, grain-size and geochemical composition of samples, three horizons were distinguished in the sediment profile, illustrating the successive change of the sedimentation environment in the lake's evolution, which occurred during climate change and accumulation of mineralogenic, organo-mineralogenic and organogenic sedimentary matter. Horizon I (7.50–7.33 m) is represented by sediments of mineral nature accumulated during the Onego Ice Lake period. Horizon II (7.33–7.26 m) is sediments formed during the period of climate changes after the separation of the lake from the Onego Ice Lake, which are characterized by a significant gradient of organic matter concentrations. Horizon III (7.26–7.10 m) was formed in the Holocene, at which time the reservoir became an accumulator of organic matter. The new information on the content and specific features of organic matter accumulation in Lake Chudesnaya Lamba sediments, along with the use of the balance model of organic matter fluxes in trophic networks, will make it possible to calculate the carbon balance in the ecosystem of the model lake and to produce predictive estimates of CO₂ fluxes from the water surface depending on the chemical composition of water and the geographical location of the lake.

Keywords: aquatic ecosystems; lake sediments; carbon balance; reconstruction of organic matter accumulation

For citation: Potakhin M. S., Belkina N. A., Bogdanova M. S., Myasnikova N. A., Morozova I. V., Gatal'skaya E. V., Orlov A. V., Pronina A. V. Specific features of organic matter accumulation in bottom sediments of Lake Chudesnaya Lamba (Kivach Nature Reserve). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 62–73. doi: 10.17076/lim1936

Funding. The research was carried out within the Key Innovative Project of State Importance «Russian Climate Monitoring System».

Введение

Изменение глобального климата в последние десятилетия связывают с резким увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере. Необходимость определения степени значимости этого процесса и его контроля обозначает проблему оценки масштабов поступления парниковых газов в атмосферу из разных источников. Наземные водные экосистемы представляют собой важный источник диоксида углерода.

Донные отложения являются одной из сред, депонирующих органическое вещество в озере. В настоящее время озерные системы, функционирующие в условиях гумидного климата, рассматриваются как приемник стока углерода, полученного наземными экосистемами из атмосферы [Biskaborn, 2016; Pfalz et al., 2023; Белкина, 2024], однако роль донных отложений как накопителя органического вещества на сегодняшний день недостаточно оценена.

Донные отложения, формирующиеся в процессе эволюции озера и его водосбора под влиянием изменения климата, хранят существенную информацию о событиях глобального и регионального уровней, в том числе и об изменении потоков углерода в системе «водосбор – водоем – атмосфера». С точки зрения цикла углерода процесс формирования донных отложений в континентальном водоеме можно рассматривать как переход углерода из биологического круговорота в геологический. В результате этого процесса происходит закрепление углерода в осадочных отложениях на тысячелетия, что обосновывает необходимость оценки накопления органического вещества в донных осадках.

Данное исследование проведено в рамках разработки системы мониторинга парниковых газов в озерно-речных системах Российской Федерации, которая обеспечит оценку вклада пресноводных экосистем (в том числе донных отложений) в глобальную структуру бюджета углерода [Лукина и др., 2024]. Для изучения этой системы был выбран модельный объект, расположенный в южной части Карелии: озеро Чудесная ламба.

В ходе исследования изучена ландшафтная структура водосборной территории модельных водных объектов, определены гранулометрический и химический состав донных отложений, сопоставлены результаты проведенных анализов, выполнена палеогеографическая реконструкция развития седиментогенеза озера Чудесная ламба и выявлены особенности накопления органического вещества со времени дегляциации территории.

Характеристика района и объекта исследования

Формирование донных отложений озер Карелии в настоящее время происходит в условиях умеренного влажного климата. Пребывание воды в течение года преимущественно в жидком фазовом состоянии создает предпосылки для множества процессов физической, химической и биологической дифференциации вещества на всех стадиях озерного седиментогенеза. Углерод поступает в донные отложения в составе детрита и нерастворимых гумусовых веществ.

В настоящее время на территории Южной Карелии доминируют озера со смешанным типом седиментогенеза: железо-кремне-гумусовым, железо-гумусо-кремниевым или гумусо-железо-кремниевым. Мобилизация, транспортировка и осаждение элементов, имеющих химическое сродство к силикатным минералам, гумусу и железу (Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Sr, Ni, Mo, Co, S, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sn, Sb, Pb), контролируются особенностями поведения в водной среде основных компонентов донных отложений (кремния, железа и органического вещества). Редкие (рассеянные) элементы поступают в донные отложения с обломочным материалом. Неравномерное распределение и разнообразие осадков определяются зональными (ландшафтно-климатические условия) и азональными (геологические условия водосборных территорий, морфология озерных котловин, антропогенная нагрузка) факторами [Белкина, 2021].

Озеро Чудесная ламба расположено на Северо-Западе России, в южной части Республики Карелия, в пределах ФГБУ «Государственный заповедник «Кивач» (рис. 1) (координаты географического центра озера 62°17' с. ш. 34°01' в. д.). Площадь озера составляет 0,00686 км², длина около 160 м, ширина – 50 м, средняя глубина 4,9 м, наибольшая глубина 8,9 м.

Первые исследования озера и окружающего его болота проводились в 1960–70-х гг., тогда были изучены ботанический состав торфа и дно котловины. В 2016 и 2017 гг. изучен ботанический состав образцов органических отложений [Кутенков, 2021].

Изучение особенностей ландшафтной структуры водосбора и его окрестностей проводилось на ключевом участке площадью 130 га (1,3 км²) с применением ландшафтно-динамического подхода [Исаченко, 1998]. На основе анализа ландшафтных данных, полученных при полевых исследованиях для территории ключевого участка, разработана типология местоположений, а также составлена ландшафтная карта водосбора озера Чудесная ламба и его окрестностей (рис. 2).



Рис. 1. Район исследования

Fig. 1. Study area

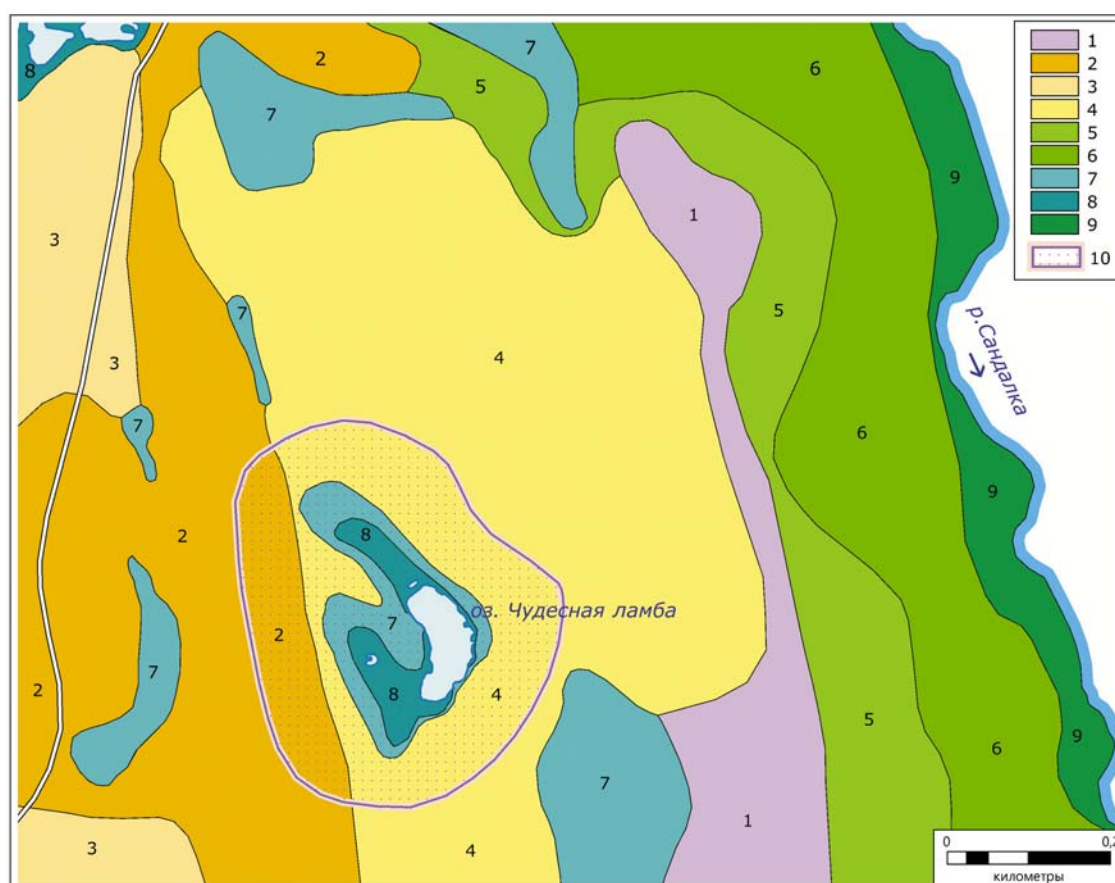


Рис. 2. Карта ландшафтной структуры водосбора и окрестностей озера Чудесная ламба (легенда карты с описанием местоположений 1–9 приведена в Приложении), 10 – водосбор озера Чудесная ламба

Fig. 2. Map of the landscape structure of the catchment and surroundings of Lake Chudesnaya Lamba (map legend with the explanation of landscape sites and long-term states 1–9 is given in Appendix), 10 – Lake Chudesnaya Lamba catchment area

Площадь водосбора озера Чудесная ламба (с учетом акватории) составляет 13,8 га (0,138 км²). На территории выделяется 4 вида местоположений. Подсчет площадей местоположений по составленной ландшафтной карте показал, что на водосборе абсолютно преобладают дренированные равнины на безвалунных песках (51 %). На них произрастают спелые и старовозрастные сосновые лишайниковые, кустарничково-лишайниковые и кустарничково-лишайниково-зеленомошные леса на маломощных грубогумусных песчаных подзолах и оподзоленных грубогумусных почвах. Более 20 % водосбора приходится на дренированные вершины и восточные склоны средней крутизны (5–25°) крупной озовой гряды, сложенной песчано-галечно-валунными отложениями. Часть склонов перекрыта безвалунными тонкозернистыми песками, часть – галечными и мелкогалечными песками, также на поверхности склонов встречаются крупные валуны. На озовой гряде произрастают преимущественно сосновые кустарничково-зеленомошные леса, на террасированных склонах – елово-сосновые чернично-зеленомошные леса, иногда встречаются группировки из ельников мертвопокровных, а также ельники с примесью березы. Почвенный покров в отличие от дренированных равнин достаточно разнообразен – грубогумусные оподзоленные почвы, подзолы разной мощности и подбуры.

Доля торфяников (заболоченность водосбора) составляет 23 %. Большая часть из них (14 %) представлена низкостойкими редкостойными сосновыми болотно-кустарничково-сфагновыми лесами и пушицево-кустарничково-сфагновыми верховыми болотами с сосной. Олиготрофные торфяники с участками грядово-озерковых комплексов состоят из небольших гряд или кочек, покрытых болотнокустарничково-сфагновой растительностью, часто с угнетенными или сухими соснами, и мочажин с очеретниково-сфагновыми топями, а также окнами с разреженным сфагновым покровом и водой. Берега озера Чудесная ламба – пушицево-кустарничково-сфагновые сплавины.

На территории ключевого участка отмечены следы прошлого антропогенного воздействия: окопы времен Великой Отечественной войны, углежогные ямы времен Кончезерского меде- и чугуноплавильного завода, а также следы подпочки для сбора живицы. В настоящее время антропогенное воздействие на ландшафты не наблюдается.

Для малых озер Карелии разнообразие седиментационных обстановок связано с локальными ландшафтными условиями водосборов.

Наиболее важными его характеристиками в равной мере являются химический состав воды, площадь водосбора и рельеф. Озеро Чудесная ламба отличается малыми размерами и ровным характером дна, малой площадью водосбора и атмосферным питанием. Влияние водосборной территории на процесс формирования донных отложений минимально. Осадочный процесс в озере контролируется биотой, причем не только водной, но и болотной. Водоем является зарастающим (сплавина присутствует по всей береговой линии), окружен болотом, которое в два раза превышает площадь озера.

Материалы и методы

Донные отложения озера Чудесная ламба были вскрыты в апреле 2024 г. (скважина 24-01, два керна донных отложений, общая мощность 1,2 м). Отбор длинных кернов донных отложений осуществлялся торфяным буром (длина пробоотборной части 1 м, ширина 5 см) со льда и выполнялся с наложением для последующей их корреляции и отсутствия промежутков при составлении отдельных кернов в единый разрез отложений. В полевых условиях проведено первичное литологическое описание, включающее цвет осадка, границы смены литологического характера отложений, описание имеющихся минеральных или органических вкраплений. Керны были упакованы для доставки в институт и разобраны на образцы в лабораторных условиях. На каждый вид анализа отбиралось по шесть образцов с глубин 7,50–7,10 м с интервалом 4 см.

Подготовка проб для проведения гранулометрического анализа состояла в удалении крупных органических включений, перемешивании образца в воде в магнитной мешалке в течение 7 минут, затем образец помещался в ультразвуковую ванну мощностью 60 Вт на 2 минуты. Гранулометрический состав донных отложений изучен с помощью лазерного анализатора частиц LS 13 320 (Beckman Coulter, США). Для численной оценки статистик эмпирических распределений частиц по размерам использовался метод квартилей [Trask, 1932]. Фракции отложений описаны по классификации механических элементов [Качинский, 1958], диаметр частиц указан в микрометрах.

Для исследуемого керна донных отложений проведены следующие анализы: потери массы при прокаливании (ППП), зольность осадка, $N_{орг}$ [Аринушкина, 1982], содержание $C_{орг}$ [ПНД Ф 14.1:2:3:4.279-14; ГОСТ Р 52991-2008] (анализатор Shimadzu TOC-LCSN, Япония) и $P_{общ}$ [РД 52.24.382-2019].

Результаты

Литологическое описание исследуемого разреза донных отложений озера Чудесная ламба приведено на рис. 3.

Дно озера покрыто мощным покровом водного мха (*Warnstorfia fluitans*), высота которого достигает 3 и более метров. В данном исследовании авторы сосредоточили внимание на особенностях накопления органического вещества, поэтому было принято решение детально изучить центральный участок разреза с переслаиванием гиттии с торфом и бурым алевритом в нижней части (глубины 7,50–7,10 м). Выше этого участка расположена подушка из частично разложившегося мха, а ниже – слой плотного серого алеврита (рис. 3).

Литологическое описание исследуемого участка разреза (7,50–7,10 м) и визуализация результатов гранулометрического и химических анализов представлены на рис. 4. В ходе обобщения полученных данных выделены три горизонта, которые свидетельствуют о разных седиментационных обстановках в озере Чудесная ламба.

Горизонт I (7,50–7,33 м). Осадок представлен серым алевритом. Значения ППП наименьшие в нижней части разреза, увеличиваются

от 0 до 50 %, тренд на повышение значения сопоставим с плавным переходом цвета алеврита от серого к бурому. Только в этом горизонте присутствуют наиболее тонкие фракции до 1 мкм (коллоиды и илы), их доля изменяется от 7 до 0,5 %. Выше по разрезу происходит увеличение фракции мелкого песка (50–250 мкм), его доля изменяется от 0 до 52 %. Зольность достигает наибольших значений в керне в нижней части (93 %), далее плавно уменьшается до 83 %. Рассматриваемый состав органических веществ ($C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{общ}$) в этом горизонте также имеет наименьшие значения в нижней части разреза, но при уменьшении глубины происходит плавное увеличение значений: $C_{орг}$ – 1–10 %, $N_{орг}$ – 0,08–1,9 % и $P_{общ}$ – 0,102–0,11 %. Стоит отметить, что $P_{общ}$ в целом слабо выражен в отложениях озера Чудесная ламба (диапазон от 0 до 0,15 %).

Отложения горизонта II (7,33–7,26 м) представлены в верхней части светло-коричневой гиттией и ниже двумя слоями бурого и желто-коричневого торфа. Результаты анализов подтверждают нестабильное состояние водоема во время образования этой части разреза, наблюдается довольно резкое колебание во всех исследуемых показателях. Происходит быстрое

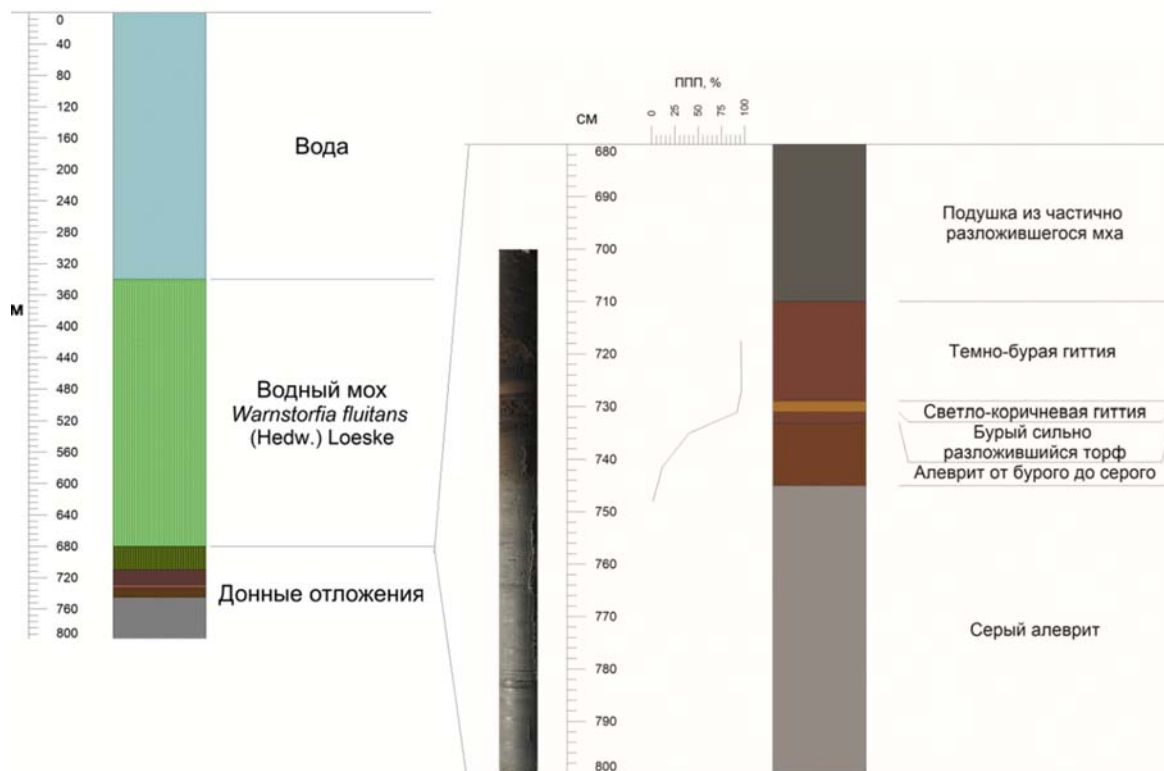


Рис. 3. Разрез донных отложений озера Чудесная ламба, керн ст. 24-01

Fig. 3. Bottom sediments section of Lake Chudesnaya Lamba, core of st. 24-01

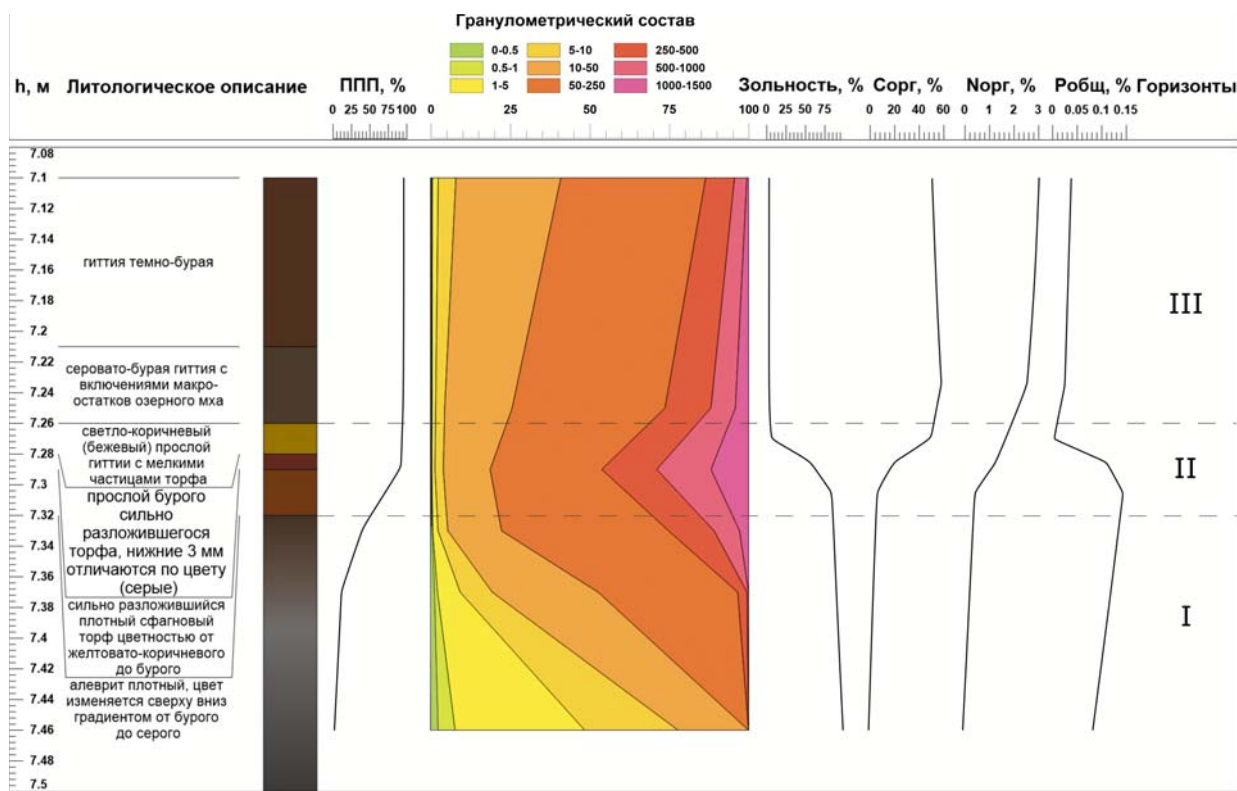


Рис. 4. Общая схема изучения разреза донных отложений озера Чудесная ламба

Fig. 4. General scheme of studying the section of bottom sediments of Lake Chudesnaya Lamba

увеличение ППП (50–96 %). По результатам гранулометрического анализа в горизонте преобладают наиболее крупные в этом разрезе фракции среднего (250–500 мкм) и крупного (500–1000 мкм) песка, а также грубообломочных частиц (1000–1500 мкм). Графики значений зольности, $C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{общ}$ на этом участке также достаточно резко изменяются. Выше по разрезу зольность и $P_{общ}$ неуклонно падают (83–2 и 0,11–0,025 % соответственно), а $C_{орг}$ и $N_{орг}$ возрастают (соответственно 10–57 и 1,9–2,5 %).

Верхняя часть разреза, горизонт III (7,26–7,10 м), сложена серовато-бурой и темно-бурой гиттией. В данной части разреза ППП стабильно высокий (95 %), по гранулометрическому составу преобладают крупная пыль (10–50 мкм) и мелкий песок (50–250 мкм), суммарно их доля в горизонте составляет около 78 %. Зольность неизменно мала (3 %), при уменьшении глубины $C_{орг}$ уменьшается (с 57 до 47 %), $N_{орг}$ незначительно увеличивается (с 2,5 до 2,9 %), $P_{общ}$ также незначительно увеличивается (с 0,025 до 0,043 %).

По коэффициентам сортировки (S_o) и асимметрии (S_k) все пробы донных отложений озера Чудесная ламба относятся к плохо сортированным осадкам, в основном преобладает мелкий песок (50–250 мкм).

Обсуждение

Озеро Чудесная ламба расположено между крупной флювиогляциальной системой на западе и обширной озерно-ледниковой равниной на востоке. Флювиогляциальная система представляет собой серию озовых гряд, образованных проекцией песчано-гравийно-галечных отложений внутрiledниковых потоков на ложе ледника. Она начала формироваться в аллереде (ок. 13,5 тыс. кал. л. н.) [Демидов и др., 2006] при отступлении края ледника с территории Южной Карелии. Озерно-ледниковая равнина образовалась при дальнейшем таянии льда, которое привело к возникновению Онежского приледникового озера (ок. 120–125 м над ур. м.) [Демидов, 2006; Zobkov et al., 2019]. В водоеме накапливались ледниково-озерные отложения, в том числе в глубоководных условиях сезонно слоистые ленточные глины. Наибольшей мощности и распространения эти отложения достигают в депрессиях ложа вдоль флювиогляциальных систем, по которым шло основное поступление талых вод и песчано-глинистых наносов в приледниковое озеро [Демидов и др., 2006]. Однако в полученном разрезе донных отложений

мы не наблюдаем ленточных глин, вероятно, они залегают на большей глубине, добраться до которой при помощи ручного бура в данной точке котловины озера не представилось возможным.

Около 13,2 тыс. кал. л. н., предположительно во время потепления аллереда, после освобождения от материкового льда Онежско-Беломорского, а затем Онежско-Ладожского перешейков, произошло резкое падение уровня приледникового водоема (более чем на 25 м) и осаждение в условиях мелководий алевритов [Демидов, 2006; Zobkov et al., 2019]. В разрезе донных отложений озера Чудесная ламба нижний слой представлен серыми алевритами, формирование которых можно отнести к этому периоду истории Онежского приледникового озера (слой серого алеврита 8,00–7,50 м, нижняя часть полного разреза).

Дальнейшее понижение уровня Онежского озера, связанное в том числе с открытием стока по р. Свирь (ок. 12,3 тыс. кал. л. н.) [Демидов, 2006; Zobkov et al., 2019], способствовало образованию обширных мелководных заливов. В них началось накопление отложений с повышенным содержанием органического вещества. Этот период в разрезе донных отложений озера Чудесная ламба маркируется слоем алевритов от серого до бурого (горизонт I, 7,50–7,33 м), где ППП увеличиваются от 1 до 50 %. Следует отметить, что накопление органических отложений в ближайших изученных озерах началось в этот же период – около 12,2–12,0 тыс. кал. л. н., например, в озерах Шавнилампи – $10\,490 \pm 110$ ^{14}C л. н. (ЛЕ 6988) и Большое Хаугилампи – $10\,060 \pm 130$ ^{14}C л. н. (ЛЕ 6986) [Шелехова и др., 2005].

В ходе дальнейшего понижения уровня происходило обмеление заливов и их заболачивание. В донных отложениях изучаемого водоема выделяется слой бурого сильно разложившегося торфа (горизонт II, 7,33–7,26 м).

Полное обособление водоема произошло ориентировочно после окончания ледниковой эпохи, в пребореале – бореале (ок. 11–10 тыс. кал. л. н.), в том числе за счет просадки его днища в результате таяния погребенного льда. В это время отмечается быстрый рост температуры в Северном полушарии с некоторыми периодами похолоданий. Повышение уровня воды способствовало интенсивному накоплению темно-бурых органических отложений (горизонт III, 7,26–7,00 м).

Процесс заболачивания и зарастания озера Чудесная ламба сплавиной, который продолжается и в настоящее время, начался, вероятно, в атлантике (ок. 9 кал. тыс. л. н.),

этот период отмечается как наиболее влажный и теплый в Северной Европе в голоцене.

Выделенные на основе изучения стратиграфии донных отложений периоды истории водоема с разными условиями формирования отложений подтверждаются результатами гранулометрического и химических анализов.

Заключение

В ландшафтной структуре водосбора озера Чудесная ламба преобладают местоположения дренированных равнин на безвалунных песках и озовых грядах с сосновыми кустарничково-лишайниковыми лесами на подзолах, а также олиготрофных торфяников с пушицево-болотнокустарничково-сфагновыми болотами с редкостойной сосной и безлесными на верховых болотных почвах. Следов современного антропогенного воздействия на ландшафты не выявлено.

На основе литостратиграфического описания, гранулометрического и химического анализов донных отложений озера выделены три горизонта, свидетельствующие о разных седиментационных обстановках, реконструирована история осадочного процесса в озере.

Донные отложения, накопленные в период существования Онежского приледникового озера (горизонт I, 7,50–7,33 м), закономерно имеют минеральный характер: зольность 94 %, $C_{\text{орг}}$ 1–10 %, ППП 1,4 %. Осадки, формировавшиеся в период климатических изменений, после того как водоем потерял контакт с краем ледника (горизонт II, 7,33–7,26 м), отличаются значительным градиентом концентраций органического вещества (изменение ППП от 1,4 до 92 %, $C_{\text{орг}}$ – от 10 до 50 %). В голоцене (горизонт III, 7,26–7,10 м) водоем становится накопителем органического вещества: содержание $C_{\text{орг}}$ колеблется в пределах 47–58 %, ППП – 92–96 %.

Озеро Чудесная ламба в условиях гумидного климата как элемент ландшафта выполняет функцию накопителя органического вещества. Скорость накопления углерода низкая – около 1 кг $C_{\text{орг}}$ на 1 м² дна за 100 лет [Лукина и др., 2024].

Полученная информация о содержании и особенностях накопления органического вещества в донных отложениях озера Чудесная ламба вместе с использованием балансовой модели потоков органического вещества в трофических сетях позволят рассчитать баланс углерода в экосистеме модельного водоема и разработать прогнозные оценки потоков CO_2 с поверхности воды в зависимости от химического состава воды и географического положения водоема.

Легенда карты ландшафтной структуры района исследований
Legend of the landscape structure map of the study area

№ No.	Виды местоположений и преобладающих состояний растительности и почв Landscape sites and dominant long-term states of vegetation and soil types	Площадь Area		
		км ² km ²	га ha	%
1	Невысокие пологосклонные супесчано-валунные (моренные) холмы и гряды, сложенные несортированными песками с плохо окатанными валунами, в сочетании с участками пологонаклонных равнин на безвалунных песках и валунных супесях, дренированные. Растительность: сосновые, елово-сосновые с примесью березы чернично-зеленомошные и кустарничково-вейниково-зеленомошные леса. Почвы: подбуры грубогумусные иллювиально-железистые супесчаные среднещебнистые Low gently sloping sandy loamy boulder (moraine) hills and ridges composed of unsorted sands with weakly rolled boulders, combined with areas of flat plains on boulder-free sands and boulder loams, drained. Vegetation: pine, spruce-pine with admixture of birch, bilberry-green-moss and shrub-brambrerry-green-moss forests. Soils: podburs coarse-humus illuvial-iron loamy medium loamy	0,085	8,5	7
2	Округлые холмы и группы холмов с крутыми склонами и склонами средней крутизны (5–25°); сложены валунами, с поверхности безвалунными, галечными и мелковалунными песками и супесями (озы); хорошо дренированные, с минеральными почвами; нередко в сочетании с термокарстовыми впадинами. Растительность: сосновые, елово-сосновые лишайниковые, чернично-зеленомошные и кустарничково-зеленомошно-лишайниковые леса. Почвы: подзолы иллювиально-гумусовые; подбуры оподзоленные иллювиально-гумусовые Rounded hills and groups of hills with steep slopes and slopes of medium steepness (5-25°); composed of boulders, boulderless, pebble and fine-boulder sands and sandy loam from the surface; well-drained, with mineral soils; often combined with thermokarst hollows. Vegetation: pine, spruce-pine lichen forests, bilberry-green-moss and shrub-green-moss-lichen forests. Soils: illuvial-humus podzols; illuvial-humus podburs	0,240	24,0	19
3	Дренированные волнистые и слабоволнистые равнины, сложенные мелковалунно-галечными (флювиогляциальными) песками, с щебнем сильной окатанности. Растительность: сосновые, елово-сосновые лишайниковые, чернично-зеленомошные и кустарничково-зеленомошно-лишайниковые леса. Почвы: подбуры, в том числе оподзоленные иллювиально-гумусовые Drained undulating and slightly undulating plains composed of small boulder-pebble (fluvioglacial) sands with gravel. Vegetation: pine, spruce-pine lichen forests, bilberry-green-moss and shrub-green-moss-lichen forests. Soils: podzols, including podzolic illuvial-humus soils	0,064	6,4	5
4	Дренированные волнистые равнины на безвалунных (озерно-ледниковых, озерных) песках; с минеральными почвами. Растительность: сосновые, сосновые с примесью ели лишайниковые, чернично-зеленомошные и кустарничково-зеленомошно-лишайниковые леса. Почвы: подзолы, в том числе оподзоленные иллювиально-гумусовые Drained undulating plains on lake-glacial, lake sands; with mineral soils Vegetation: pine, pine with admixture of spruce lichen, bilberry-green-moss and shrub-green-moss-lichen forests. Soils: podzols, including podzolic illuvial-humus soils	0,380	38,0	30
5	Слабоволнистые пологонаклонные (до 5°) равнины на безвалунных глинах и суглинках. Растительность: елово-сосновые с примесью березы, осиново-елово-сосновые, осиново-еловые чернично-зеленомошные, вейниково-кустарничково-зеленомошные и травяно-чернично-зеленомошные леса. Почвы: дерново-глеевые Slightly undulating gently sloping (up to 5°) plains on clays and loams. Vegetation: spruce-pine with birch, aspen-spruce-pine, aspen-spruce-pine, aspen-spruce-blackberry-green-moss, reed-bush-green-moss and grass-blackberry-green-moss forests. Soils: soddy-gley	0,128	12,8	10

№ No.	Виды местоположений и преобладающих состояний растительности и почв Landscape sites and dominant long-term states of vegetation and soil types	Площадь Area		
		км ² km ²	га ha	%
6	Плоские и пологонаклонные равнины на безвалунных глинах и суглинках, длительно естественно переувлажненные, с органоминеральными почвами (торфянистый горизонт мощностью до 0,5 м). Растительность: елово-березовые травяно-осоково-папоротниковые леса и осоково-тростниковые с порослью березы растительные сообщества. Почвы: торфяно-глеевые, торфянисто-глеевые Flat and gently sloping plains on clays and loams, naturally overmoistened for a long time, with organomineral soils (peat horizon up to 0.5 m thick). Vegetation: spruce-birch grass-sedge-sedge-fern forests and sedge-reed with birch overgrowth. Soils: peaty-gleyey, peaty-gleyey soils	0,194	19,4	15
7	Олиготрофные (верховые) торфяники с гомогенной структурой и мелкобугристым микро-рельефом; с постоянным естественным избыточным увлажнением; органогенные почвы (мощность торфа более 0,5 м). Растительность: сосновые кустарничково-сфагновые леса, пушицево-кустарничково-сфагновые верховые болота с сосной и безлесные. Почвы: торфяные болотные Oligotrophic peat with homogeneous structure and shallow bumpy microrelief; with permanent natural excessive moisture; organogenic soils (peat thickness more than 0.5 m). Vegetation: pine-sphagnum forests, shrub-sphagnum bogs with pine and non-forested. Soils: peat bog soils	0,100	11,6	9
8	Олиготрофные (верховые) торфяники с грядово-мочажинными и грядово-озерковыми комплексами с постоянным естественным избыточным увлажнением, органогенные почвы (мощность торфа более 2 м). Растительность: по грядам и кочкам – кустарничково-сфагновые угнетенные сосняки; в мочажинах – очеретниково-сфагновые топи, разреженный сфагновый покров, вода. Почвы: торфяные болотные Oligotrophic peatlands with ridge and ridge and lake complexes with permanent natural excessive moisture, organogenic soils (peat thickness more than 2 m). Vegetation: on ridges and bumps – shrubby sphagnum depressed pine forests; sphagnum swamps, sparse sphagnum cover. Soils: peaty bog soils	0,018	1,8	1
9	Поймы и надпойменные террасы рек, с периодическим избыточным увлажнением. Растительность: заросли тростника, мелколиственно-высокотравные растительные ассоциации. Почвы: глеевые, торфяно-глеевые Floodplains and floodplain terraces of rivers, with periodic excessive moistening. Vegetation: reed thickets, small-leaved-high herbaceous plant associations. Soils: gley soils, peat-gley soils	0,052	5,2	4
Всего (без учета площади водных объектов) Total (excluding the area of water bodies)		1,261	127,7	100

Литература

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1982. 487 с.

Белкина Н. А. Закономерности осадконакопления и раннего диагенеза донных отложений в водоемах юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. СПб., 2021. 48 с.

Белкина Н. А. Поверхностные донные отложения карельских озер, особенности формирования и химический состав // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 3. С. 120–129. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-111

ГОСТ Р 52991-2008. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. М.: Стандартинформ, 2009. 17 с.

Демидов И. Н., Лукашов А. Д., Ильин В. А. Рельеф заповедника «Кивач» и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Природа государственного заповедника «Кивач». Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 10. С. 22–33.

Демидов И. Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменении его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9.

Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. С. 171–182.

Исаченко Г. А. Методы полевых ландшафтных исследований и ландшафтно-экологическое картографирование. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1998. 112 с.

Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 191 с.

Кутенков С. А. Тайны глубин Чудесной ламбы // Заповедник Кивач – 90 лет на страже природы: история, достижения и перспективы. Петрозаводск: Версо, 2021. С. 17–21.

Лукина Ю. Н., Белкина Н. А., Калинкина Н. М., Богданов С. Р., Зобков М. Б., Здорovenнов Р. Э., Потахин М. С., Здорovenнова Г. Э., Толстиков А. В., Пальшин Н. И., Бородулина Г. С., Богданова М. С., Мясникова Н. А., Смирнов С. И., Новикова Ю. С., Гатальская Е. В., Морозова И. В., Зобкова М. В., Сластина Ю. Л., Макарова Е. М., Сярки М. Т., Коновалов Д. С., Теканова Е. В. Разработка системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах Европейского Севера России // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 97–114. doi: 10.17076/lim1954

ПНД Ф 14.1:2:3:4.279-14. Методика измерений массовых концентраций органического углерода и общего азота в питьевых, природных и сточных водах методом высокотемпературного окисления с использованием анализаторов углерода и азота. М., 2014. 19 с.

РД 52.24.382-2019. Массовая концентрация фосфатного фосфора в водах. Методика измерений фотометрическим методом: разработана ФГБУ ГХИ: принята ФГБУ НПО Тайфун. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2019. 31 с.

Шелехова Т. С., Лазарева О. В., Демидов И. Н. Палеоэкологические условия развития Северо-Западного Прионежья в позднеледниковье и голоцене // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. С. 149–157.

Biskaborn B. K., Subetto D. A., Savelieva L. A., Vakhrameeva P. S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinecke L., Pestryakova L. A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability // Quat. Sci. Rev. 2016. Vol. 147. P. 406–421. doi: 10.1016/j.quascirev.2015.08.014

Pfaff G., Diekmann B., Freytag J., Biskaborn B. Effect of temperature on carbon accumulation in northern lake systems over the past 21,000 years // Front. Earth Sci. 2023. Vol. 11. Art. 1233713. doi: 10.3389/feart.2023.1233713

Trask P. D. Origin and environment of source sediments of petroleum. Houston: Gulf. Publ. Co, 1932. 281 p.

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D., Tarasov A. Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations // J. Paleolimnol. 2019. Vol. 62, no. 1. P. 53–71. doi: 10.1007/s10933-019-00075-3

References

Arinushkina E. V. Manual on chemical analysis of soils. Moscow: MSU; 1982. 487. p. (In Russ.)

Belkina N. A. Regularities of sedimentation and early diagenesis of bottom sediments in water bodies of the southeastern part of the Fennoscandian crystalline shield: Summary of PhD (Dr. of Geog.) thesis. St. Petersburg; 2021. 48 p. (In Russ.)

Belkina N. A. Surface sediments of Karelian lakes: their formation peculiarities and chemical composition. *Limnology and Freshwater Biology*. 2024;3:111–119. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-111

Biskaborn B. K., Subetto D. A., Savelieva L. A., Vakhrameeva P. S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinecke L., Pestryakova L. A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability. *Quat. Sci. Rev.* 2016;147:406–421. doi: 10.1016/j.quascirev.2015.08.014

GOST R 52991-2008. Water. Methods for determining the content of total and dissolved organic carbon. Moscow: Standartinform; 2009. 17 p. (In Russ.)

Demidov I. N., Lukashov A. D., Il'in V. A. Relief of the Kivach Nature Reserve and the history of geological development of the northwestern Priozhnyye in the Quaternary period. *Priroda gosudarstvennogo zapovednika «Kivach»*. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Nature of the Kivach Nature Reserve. Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2006;10: 22–33. (In Russ.)

Demidov I. N. On the maximum stage of the Onega glacial lake development, its level change and glacioisostatic uplift of the coasts in the Late Glacial. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Mineral Resources of Karelia*. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. P. 171–182. (In Russ.)

Isachenko G. A. The methods of field study of landscape and the landscape-ecological mapping. St. Petersburg: St. Peterb. univers.; 1998. 112 p. (In Russ.)

Kachinskii N. A. Mechanical and microaggregate composition of soil, methods of its study. Moscow: AN SSSR; 1958. 191 p. (In Russ.)

Kutenkov S. A. Secrets of the depths of Lake Chudskaya Lamba. *Zapovednik Kivach – 90 let na strazhe prirody: istoriya, dostizheniya i perspektivy = Kivach Nature Reserve – 90 years on guard of nature: history, achievements, and prospects*. Petrozavodsk: Verso; 2021. P. 17–21. (In Russ.)

Lukina Y. N., Belkina N. A., Kalinkina N. M., Bogdanov S. R., Zobkov M. B., Zdorovennov R. E., Potakhin M. S., Zdorovennova G. E., Tolstikov A. V., Pal'shin N. I., Borodulina G. S., Bogdanova M. S., Miasnikova N. A., Sмирнов S. I., Novikova Y. S., Gatal'skaya E. V., Morozova I. V., Zobkova M. V., Slashtina Y. L., Makarova E. M., Syarki M. T., Konovalov D. S., Tekanova E. V. Development of a system for monitoring carbon pools and greenhouse gas flows in aquatic ecosystems of the European North of Russia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024;5:97–114. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1954

Pfalz G., Diekmann B., Freytag J., Biskaborn B. Effect of temperature on carbon accumulation in northern lake systems over the past 21,000 years. *Front. Earth Sci.* 2023;11:1233713. doi: 10.3389/feart.2023.1233713

PND F 14.1:2:3:4.279-14. Methodology for measuring mass concentrations of organic carbon and total nitrogen in drinking, natural and waste waters by high-temperature oxidation method using carbon and nitrogen analyzers. Moscow; 2014. 19 p. (In Russ.)

RD 52.24.382-2019. Mass concentration of phosphate phosphorus in waters. Methods of measurements by photometric method: developed by FBSI Hydrochemical Institute; adopted by FBSI SPA Typhoon. Rostov-on-Don: Roshydromet; 2019. 31 p. (In Russ.)

Shelekhova T. S., Lazareva O. V., Demidov I. N. Paleocological conditions of development of the Northwestern Prionezhye in the Late Glacial and Holocene. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Mineral Resources of Karelia*. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2005. P. 149–157. (In Russ.)

Trask P. D. Origin and environment of source sediments of petroleum. Houston: Gulf. Publ. Co; 1932. 281 p.

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D., Tarasov A. Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations. *J. Paleolimnol.* 2019;62(1):53–71. doi: 10.1007/s10933-019-00075-3

Поступила в редакцию / received: 15.12.2024; принята к публикации / accepted: 06.03.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Потакхин Максим Сергеевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: mpotakhin@mail.ru

Белкина Наталья Александровна

д-р геогр. наук, руководитель группы исследований донных отложений, ведущий научный сотрудник

e-mail: bel110863@mail.ru

Богданова Мария Сергеевна

младший научный сотрудник

e-mail: mari-mb@mail.ru

Мясникова Надежда Александровна

канд. геогр. наук, младший научный сотрудник

e-mail: nadezda_myasnikova@mail.ru

Морозова Ирина Валерьевна

младший научный сотрудник

e-mail: ivm1502@yandex.ru

Гатальская Екатерина Владимировна

младший научный сотрудник

e-mail: katusha9210@yandex.ru

Орлов Александр Владимирович

младший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН; младший научный сотрудник НИЛ «Рационального природопользования» РГПУ им. А. И. Герцена

e-mail: 95orlov@rambler.ru

Пронина Анастасия Викторовна

аспирант, стажер-исследователь

e-mail: anastasiya.2802@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Potakhin, Maksim

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Belkina, Natalya

Dr. Sci. (Geog.), Head of Sediment Research Group, Leading Researcher

Bogdanova, Maria

Junior Researcher

Myasnikova, Nadezhda

Cand. Sci. (Geog.), Junior Researcher

Morozova, Irina

Junior Researcher

Gatalskaya, Ekaterina

Junior Researcher

Orlov, Alexander

Junior Researcher, NWPI KarRC RAS; Junior Researcher, Research Laboratory for Sane Nature Management, Herzen University

Pronina, Anastasia

Doctoral Student, Intern Researcher

УДК 556.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БОБРОВЫХ ПРУДОВ МАЛЫХ РЕК СЕВЕРА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

А. Г. Шарифуллин¹, А. В. Гусаров¹, Д. В. Иванов^{2*}

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет (ул. Кремлевская, 18, корп. 1, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008)

² Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087), *water-rf@mail.ru

Рассмотрены особенности распределения тяжелых металлов (ТМ) (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn) в донных отложениях бобровых прудов на малых реках севера Предволжья Республики Татарстан. Полученные результаты свидетельствуют о сравнительно равномерном характере пространственного распределения металлов в отложениях изученных рек, за исключением валовых Co, Zn и Cr, а также подвижных форм Cd и Zn. Их содержание в отложениях верхних и средних участков течения рек выше, чем в нижнем течении. Распределение валовых и подвижных форм ТМ в приповерхностных отложениях бобровых прудов также равномерное, за исключением Cd и Pb. В более глубоких слоях донных отложений зоны выклинивания подпора прудов наблюдается слабая тенденция к уменьшению содержания металлов, тогда как в средней части прудов валовые содержания ТМ не отличаются контрастностью распределения. В приплотинной зоне отмечается разнонаправленная тенденция: рост валового содержания и уменьшение подвижных форм с глубиной залегания отложений. Валовое содержание ТМ коррелирует с гранулометрическим составом донных отложений и содержанием в них органического вещества. Статистически значимыми факторами в распределении подвижных форм ТМ являются расстояние от устья, длина плотин и прудов, а также содержание органического вещества в отложениях.

Ключевые слова: бобр; *Castor fiber* L.; Республика Татарстан; донные отложения; тяжелые металлы; гранулометрический состав; органическое вещество; RDA-тест

Для цитирования: Шарифуллин А. Г., Гусаров А. В., Иванов Д. В. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях бобровых прудов малых рек севера Приволжской возвышенности // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 74–90. doi: 10.17076/lim2072

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10087 (<https://rscf.ru/project/22-77-10087/>).

A. G. Sharifullin¹, A. V. Gusarov¹, D. V. Ivanov^{2*}. HEAVY METALS DISTRIBUTION PATTERNS IN BOTTOM SEDIMENTS OF BEAVER PONDS IN SMALL RIVERS IN THE NORTH OF THE VOLGA UPLAND, EUROPEAN RUSSIA

¹ Kazan (Volga Region) Federal University (18-1 Kremlevskaya St., 420008 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)

² Institute of Ecology and Subsoil Use, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan (28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia), *water-rf@mail.ru

The article presents the results of the analysis of the redistribution of heavy metals (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, and Mn) in bottom sediments of beaver ponds in small rivers in the north of the Pre-Volga Region of the Republic of Tatarstan. The results indicate a relatively uniform spatial distribution of the metals in the river sediments, except for Co, Zn, and Cr total concentrations, as well as labile forms of Cd and Zn. Their content in the sediments was higher in the upper and middle reaches compared with the lower reaches. The distribution of gross and labile forms of heavy metals in top-core sediments of beaver ponds is also uniform, except for Cd and Pb. The deeper strata of sediments in the pond's fluctuating backwater region show a weak tendency towards a decrease in the metal content, whereas the distribution of the gross content of heavy metals in the middle part of the ponds has no contrast. The tendency in the near-dam region is multidirectional: an increase in the gross content and a decrease in labile forms in the sediments with depth. The total content of heavy metals correlates with the grain size composition of the sediments and their organic matter content. Statistically significant factors in the distribution of labile forms of heavy metals are the distance to the river mouth, the length of beaver dams and ponds, and the content of organic matter in the beaver pond sediments.

Keywords: beaver; *Castor fiber* L.; Republic of Tatarstan; bottom sediment; heavy metals; grain size composition; organic matter; RDA-test

For citation: Sharifullin A. G., Gusarov A. V., Ivanov D. V. Heavy metals distribution patterns in bottom sediments of beaver ponds in small rivers in the north of the Volga Upland, European Russia. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 74–90. doi: 10.17076/lim2072

Funding. The research was carried out under Russian Science Foundation grant No. 22-77-10087 (<https://rscf.ru/project/22-77-10087/>).

Введение

Последние десятилетия продемонстрировали беспрецедентный рост населения и соответствующие ему ускоренные темпы индустриализации [Mora, 2014; Crist et al., 2017; Washington, Корпина, 2022]. Хотя качество человеческой жизни за прошедшие годы существенно улучшилось, нельзя игнорировать тот факт, что все это происходило за счет ухудшения качества окружающей среды [Jacob et al., 2018; Cafaro, 2022]. Наиболее распространенными загрязнителями, поступающими в окружающую среду, являются тяжелые металлы (ТМ) [Zhuang et al., 2009; Wang, Zhang, 2018; Hou et al., 2020; Dinis et al., 2021], такие как ртуть (Hg), кадмий (Cd), свинец (Pb), медь (Cu), хром (Cr), никель (Ni), цинк (Zn) и марганец (Mn). Хотя некоторые из указанных элементов (Cu, Zn и т. д.) весьма значимы для жизни [Mertz, 1981; Hostettler et al., 2003], они могут быть опасными,

когда их концентрации превышают приемлемый уровень [Goldhaber, 2003]. Основными источниками ТМ в водных экосистемах являются сельскохозяйственные удобрения [N'guessan et al., 2009], пестициды [Gimeno-García et al., 1996], отходы животноводческих ферм [Leclerc, Laurent, 2017] и сточные воды населенных пунктов, особенно городов [Wei, Yang, 2010].

Процессы водной эрозии способствуют перераспределению смываемых частиц почвогрунтов и связанных с ними ТМ в речных водосборах [Wu, Probst, 2021]. Значительное их количество задерживается в нижних частях склонов и днищах сухих долин [Шарифуллин и др., 2018; Шарифуллин, Гусаров, 2022; Иванов и др., 2023]. Другая часть продуктов эрозии достигает русел рек, аккумулируется в прудах и водохранилищах, где происходит переотложение наносов и транспортируемых совместно с ними ТМ.

Попадая в водную среду в виде растворенных соединений и в составе взвешенного

вещества, ТМ начинают мигрировать под контролем процессов сорбции, комплексобразования с мелкими частицами, содержащими глинистые минералы, оксиды железа и/или марганца, органические вещества, соосаждения с другими элементами [Ghreat, Yusuf, 2006; Çevik et al., 2009], гидролиза и десорбции. Физико-химические свойства отложений, включая pH, содержание карбонатов и органических веществ, а также окислительно-восстановительные условия и т. д. могут влиять на эти процессы [Du Laing et al., 2009]. ТМ легко высвобождаются из донных отложений при изменении водного режима и физико-химических условий воды/отложений [Duan et al., 2010], что может вызвать вторичное загрязнение водных масс ниже по течению [Jiao et al., 2015]. Кроме того, ТМ могут накапливаться в гидробионтах различных трофических уровней [Tokar' et al., 2023]. Предыдущие исследования [Goldyn et al., 2015; Wu, Probst, 2021] показали, что токсичные металлы, такие как Pb, Cd и Cr, в высоких концентрациях содержатся в донных отложениях прудов. Также выявлено их повышенное содержание в верхнем звене трофической цепи – в рыбах [Egemose et al., 2015; Dietrich, Ayers, 2021; Naz et al., 2022]. В этой связи оценка геохимической подвижности ТМ в донных отложениях является необходимой для анализа их возможного воздействия на окружающую среду и, в частности, на живые организмы.

Естественным барьером в транспортировке загрязняющих веществ вниз по течению рек являются бобровые пруды. Строительство плотин на малых реках нередко приводит к затоплению пойм [Neumayer et al., 2020; Brazier et al., 2021], изменению их гидрологического режима [Pollock et al., 2017; Stout et al., 2017; Larsen et al., 2021; Wohl, 2021], снижению скорости течения водотока [Green, Westbrook, 2009; Nyssen et al., 2011] и накоплению на дне прудов богатых органическими веществами отложений [Błędzki et al., 2011; Wohl, 2013], нитратов [Klotz, 2010; Law et al., 2016] и фосфатов [Devito et al., 1989; Klotz, 1998; Bason et al., 2017; Puttock et al., 2018]. Бобровые пруды с их тонкодисперсными осадками могут также функционировать как объекты повышенного депонирования ТМ [Fletcher et al., 2019], в том числе метилртути [Levanoni et al., 2015; Čiuldienė et al., 2020]. Это обстоятельство может способствовать естественному очищению вод малых рек [Butler, Malanson, 2005; Kalvite et al., 2021].

Исследования влияния бобровой деятельности на геохимические характеристики донных отложений малых рек, включая процессы накопления в них соединений ТМ, ранее проводились

преимущественно в Северной Америке, а также в Северной и Центральной Европе. В России подобные работы начались гораздо позже и являются сравнительно малочисленными [Otyukova, 2009; Gatti et al., 2018; Башинский, Осипов, 2019; Katsman et al., 2020]. При этом весьма мало исследований, в которых проведена пространственная оценка влияния бобровых сооружений малых рек на распределение ТМ. В этой связи на примере двух малых рек лесостепной зоны возвышенного востока Русской равнины выполнен анализ распределения ТМ в их донных отложениях, накопленных под влиянием бобровой деятельности. Полученные результаты имеют практическое значение для оценки экологического состояния и прогнозирования влияния деятельности бобров на гидрохимические характеристики малых рек, бассейны которых интенсивно освоены человеком.

Территория исследования

Полевые работы проводились летом-осенью 2022 г. в бассейнах рек Морквашинка и Морквашка (правые притоки р. Волга) (рис. 1), различающихся протяженностью, площадью бассейна и степенью антропогенной преобразованности их водосборов (табл. 1). Выбор этих рек обусловлен тем, что их долины типичны в геоморфологическом отношении не только для исследуемого региона, но и для всего севера Приволжской возвышенности [Бутаков, 1991]. Общая длина реки Морквашинка, по данным ГНСС-съемки, составляет 16,2 км (вместе с сухой долиной в верховьях – 16,6 км), а реки Морквашка – 7,4 км (7,8 км) [Sharifullin et al., 2023]. Строительство каскада антропогенных прудов в верховьях р. Морквашинка и водозабор для частных домохозяйств привели к значительному снижению стока воды, особенно в период летне-осенней межени. Немаловажную роль в сокращении стока играет высокое испарение с поверхности бобровых прудов. Все это приводит к обособлению в русле реки сухих участков, а появление стока в русле в летнюю межень связано с небольшими боковыми притоками, разгружающими подземные воды.

Для р. Морквашинка характерна асимметрия склонов долины. Правый склон почти на всем протяжении крутой и высокий, левый – более пологий. Долина р. Морквашка относительно симметрична. Бассейны исследуемых рек сложены породами верхней перми, перекрытыми толщей делювиально-солифлюкционных суглинков. В исследуемых речных бассейнах распространены тяжелосуглинистые

и глинистые серые лесные остаточно-карбонатные почвы (табл. 1). Донные отложения рек и приводораздельные почвы в целом характеризуются однородным гранулометрическим составом с преобладанием (более 69–75 %) фракции физической глины (< 0,01 мм) (табл. 2).

Коренная растительность представлена липово-дубовыми лесами с примесью клена, бука, вяза (40 % общей площади водосбора на реке Морквашинка и 60 % – на реке Морквашка) [Ермолаев и др., 2007]. Бассейны рек сильно изменены деятельностью человека, что выражается в высокой распаханности и частичной урбанизации (город Иннополис в бассейне

р. Морквашка), высокой плотности сельских и дачных поселений. В настоящее время поймы рек в результате активной деятельности бобров сильно зарастают ивой, и лишь отдельные их участки используются как пастбища и сенокосы.

Бобры в исследуемых реках, по нашим наблюдениям и опросу местных жителей, появились в конце 2000-х годов. Согласно предыдущим исследованиям [Sharifullin et al., 2023; Gusarov et al., 2024], суммарная протяженность запруженного бобровыми плотинами русла р. Морквашинка составляет 7,98 км (48 %), естественного (свободного от бобровой

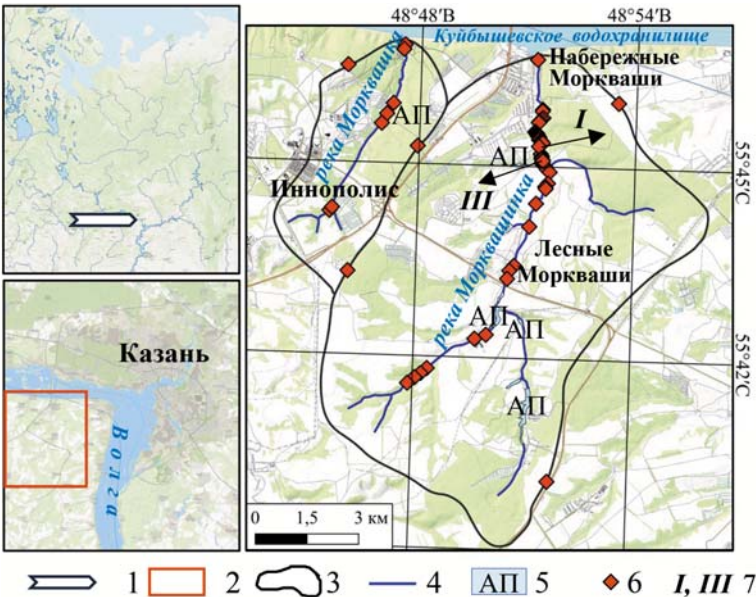


Рис. 1. Изученные реки и их расположение на Русской равнине:

1 – расположение исследуемой территории в европейской части России, 2 – на участке резкого поворота реки Волги у города Казани; 3 – границы бассейнов рек, 4 – водотоки, 5 – антропогенные пруды, 6 – места отбора проб на водоразделе и в руслах рек, 7 – местоположение прудов I, III

Fig. 1. The studied rivers and their location on the Russian Plain:

1 – location of the study area in the European part of Russia, 2 – in the section of the sharp turn of the Volga River near Kazan, 3 – borders of the river basins, 4 – watercourses, 5 – man-made ponds, 6 – sampling sites on the watershed and in the river channels, 7 – the location of pond I, III

Таблица 1. Некоторые характеристики изученных малых рек и их бассейнов

Table 1. Some characteristics of the studied small rivers and their basins

Реки Rivers	L, км L, km	S, км ² S, km ²	H, м H, m	α, %	Y, мм Y, mm	Ant, %	F, %
Морквашка Morkvashka	7,8	20,4	165	1,98	146	3	55
Морквашинка Morkvashinka	16,6	86,9	152	0,92	136	20	43

Примечание. L – длина реки; S – площадь бассейна реки; H – средняя высота бассейна реки; α – уклон реки; Y – средний многолетний годовой слой стока воды в бассейне реки; Ant – доля культивируемых (за исключением заброшенных) земель; F – залесенность общей площади бассейна реки.

Note. L – river length; S – river basin area; H – average river basin elevation; α – river slope; Y – average annual water runoff depth in the basins of the rivers; Ant – share of cultivated (excluding abandoned) land, F – forest cover of the river basin.

деятельности) – 8,6 км (52 %); на р. Морквашка – 2,05 (26 %) и 5,75 (74 %) км соответственно. На участках с относительно малыми и средними уклонами русла р. Морквашинка бобровой деятельностью охвачено 35 % (от длины каждого участка), а на участках со сравнительно большими уклонами – 0 %; на р. Морквашка – 31 и 0 % соответственно. Общее количество действующих бобровых плотин по всему руслу р. Морквашинка составляет 61 единицу, а по р. Морквашка – 40 единиц. Из них все бобровые плотины расположены на участках русла с относительно малыми (менее 1 %) и средними (1–3 %) уклонами. Средняя плотность плотин на р. Морквашинка – 3,7 ед./км; на р. Морквашка – 5,1 ед./км, изменяясь от 0 до 7,6 ед./км. Наибольшая плотность плотин отмечена на участках русла со средними уклонами.

Методы исследования

Полевые работы

Для выявления локальных фоновых значений концентраций ТМ в бассейнах исследуемых рек летом-осенью 2022 г. были отобраны образцы верхнего слоя почвы на пяти площадках, расположенных на приводораздельных поверхностях (рис. 1). Основными критериями выбора площадок являлись: горизонтальность поверхности почвы как на самой площадке, так и в ее ближайших окрестностях; наличие древесной растительности возрастом не менее 40 лет (как показатель отсутствия распаханности почв и прочей активной хозяйственной деятельности в указанный период), а также отсутствие видимых признаков эрозионного смыва почв. На каждой площадке были отобраны смешанные (по трем точкам на площадке) образцы почв с глубины 0–10 см (исключая лесную подстилку и/или дернину).

После детального обследования двух исследуемых рек [Sharifullin et al., 2023] были выбраны несколько бобровых прудов в верхнем, среднем и нижнем течениях рек для комплексной оценки распределения ТМ в донных отложениях. Образцы последних отбирались в приплотинных частях 27 прудов с помощью ручного пробоотборника (EIJKELKAMP 04.23.SA; внутренний диаметр 3,6 см) с глубины 0–20 см (рис. 1). Дополнительно были отобраны образцы в средней части и в зоне выклинивания подпора (23 пробы, пруды I–V), в естественном русле (ниже пруда I и в среднем течении) без плотин (21 проба) и приустьевой части рек (2 пробы). Каждый проанализированный образец донных отложений составлен смешением

трех проб, отобранных в трех точках из разных частей дна пруда – одна в наносах заиленного русла, две другие – из наносов на правобережной и левобережной затопленной пойме. В пруду III с помощью бура Burkle Purkhauer были отобраны керны донных отложений в трех точках, расположенных на расстоянии 2 м друг от друга (в углах равностороннего треугольника). На основе изменения внешних морфологических признаков (окраски и структуры) в кернах были выделены аккумулятивные слои, определена их мощность и глубина залегания. Путем перемешивания образцов из одного слоя (метод квартования), но взятых из разных кернов, были подготовлены интегральные пробы. Всего в ходе полевых работ отобрано 80 образцов почв и донных отложений.

Лабораторные работы

Гранулометрический состав анализировался пипеточным методом по [ГОСТ 12536-2014]. В каждом образце определялось содержание глины (размер частиц менее 5 мкм), ила (5–50 мкм) и песка (50–1000 мкм). Содержание общего органического вещества в отобранных образцах почв и донных отложений определялось методом сухого озоления при температуре 550 °C по [ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.32–02].

Содержание ТМ (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn) в почвах и донных отложениях прудов определялось по [ПНД Ф 16.2.2:2.3.71–2011] путем экстракции 5М HNO₃ (валовые (кислоторастворимые) формы) и ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH = 4,8 (подвижные формы). Концентрацию металлов в растворе измеряли на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAnalyst 400 (Perkin Elmer) в пламени ацетилен-воздух.

Статистика

Статистическая обработка данных проводилась в программном приложении XLSTAT 2016.02.28451 для Microsoft Excel и OriginPro 10.2.0.196. Определение величины линейной связи осуществлялось с использованием коэффициента корреляции Спирмена. Для определения влияния факторов на распределение ТМ использовались RDA-тест (Redundancy Analysis) и анализ избыточности. Предварительно проводилось нормирование данных для снижения размерности признаков пространства. Значимость влияния факторов (предикторов) в RDA оценивалась с использованием теста значимости (Permutation Test) и дисперсионного анализа (ANOVA).

Результаты и обсуждение

Гранулометрический состав и содержание органического вещества

Гранулометрический состав донных отложений исследуемых рек в целом однороден (табл. 2), с преобладанием тонкодисперсных фракций. Небольшие изменения наблюдаются вдоль рек: вниз по течению происходит незначительное увеличение песчаных фракций в бобровых прудах с 29 до 46 % на реке Морквашка и с 12 до 27 % на реке Морквашинка. Увеличение доли более грубого материала в нижних течениях обусловлено в том числе размывом крутых берегов, особенно в период половодья и летних паводков. Внутри прудов (рис. 2)

по мере приближения к плотинам доля пелитовой фракции практически не изменяется. В профиле донных отложений зоны выклинивания пруда гранулометрический состав весьма однороден; в средней части с глубиной незначительно увеличивается доля песчаной и глинистой фракций, а в приплотинной зоне незначительно уменьшается доля песчаной и увеличивается доля глинистой фракций. Содержание органического вещества в донных отложениях и приповерхностных слоях почв варьируется от 3,8 до 13,7 % соответственно (табл. 3). Также выявлены статистически незначимые различия в содержании органического вещества в бобровых прудах и незарегулированных участках русел рек. В верхнем течении количество органики составило в среднем 7,7–8,6 %, ниже

Таблица 2. Гранулометрический состав (%) донных отложений и почв исследуемых рек и их водосборов
Table 2. Particle size distribution (%) of bottom sediments and soils of the studied rivers and their catchments

Объект исследования Study object		Верхнее течение Upper reaches				Среднее течение Middle reaches				Нижнее течение Lower reaches				Общее для рек Total			
		N	Sd	SI	Cy	N	Sd	SI	Cy	N	Sd	SI	Cy	N	Sd	SI	Cy
Морквашка Morkvashka	P	2	29	45	26	3	20	44	36	1	46	30	23	6	31	40	29
	C	0	-	-	-	0	-	-	-	1	58	25	17	1	58	25	17
Морквашинка Morkvashinka	P	8	12	52	36	8	21	43	33	28	27	45	28	44	27	46	27
	C	0	-	-	-	2	48	27	25	20	22	47	31	22	25	45	30
Почвы водоразделов Near-water-divide surface soils	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	19	57	24

Примечание. P – пруды, C – русло, N – количество образцов, Sd – песок, SI – ил, Cy – глина.

Note. P – ponds, C – channel, N – number of samples, Sd – sand, SI – silt, Cy – clay.

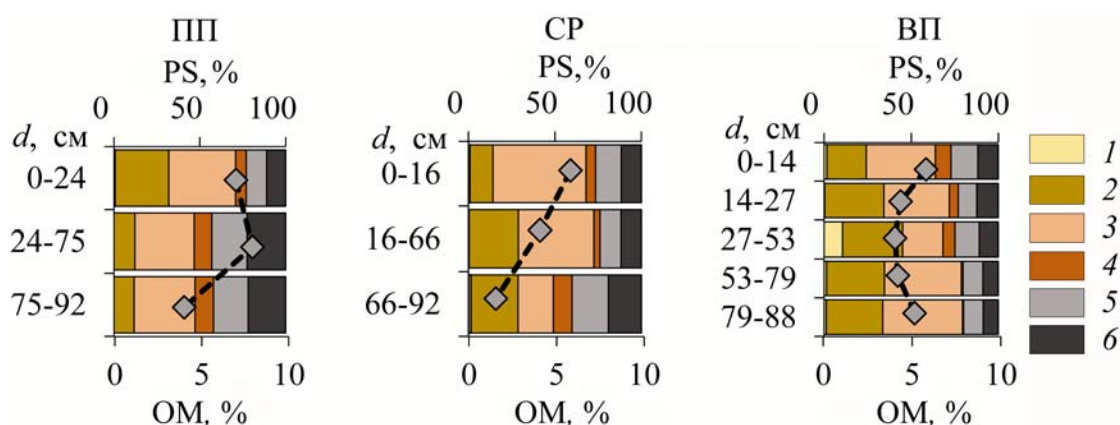


Рис. 2. Изменение гранулометрического состава и содержание органического вещества в донных отложениях внутри бобрового пруда III.

Здесь, в табл. 5 и на рис. 3: ПП – приплотинная часть, CP – средняя часть, ВП – зона выклинивания подпора. PS – размерные фракции, OM – общее содержание органического вещества, 1 – 1–0,25 мм, 2 – 0,25–0,05 мм, 3 – 0,05–0,01 мм, 4 – 0,01–0,005 мм, 5 – 0,005–0,001 мм, 6 – < 0,001 мм

Fig. 2. Changes in grain size distribution and organic matter content of bottom sediments within beaver pond III.

Here and in Tab. 5, and in Fig. 3: ПП – at the beaver dam, CP – in the middle section, ВП – in the pond wedging zone. PS – grain size, OM – total organic matter content, 1 – 1–0.25 mm, 2 – 0.25–0.05 mm, 3 – 0.05–0.01 mm, 4 – 0.01–0.005 mm, 5 – 0.005–0.001 mm, 6 – < 0.001 mm

по течению оно уменьшалось до 5,0–5,8 % в прудах и 3,2–3,8 % в руслах. Внутри прудов (рис. 2) содержание органического вещества в целом сохраняется на более или менее близком уровне. С глубиной в профиле отложений зоны выклинивания подпора пруда количество органики практически не изменяется, однако в средней и приплотинной частях прудов наблюдается слабая тенденция к его снижению.

Содержание тяжелых металлов в донных отложениях

Содержание валовых и подвижных форм ТМ в донных отложениях бобровых прудов на различных участках русла рек представлено в табл. 4. Анализ полученных результатов позволяет в целом отметить равномерное распределение всех исследованных металлов по продольному

Таблица 3. Содержание органического вещества в донных отложениях и почвах водоразделов исследуемых рек
Table 3. Organic matter content in bottom sediments and near-water-divide surface soils of the studied rivers

Объект исследования Study object		Верхнее течение Upper reaches		Среднее течение Middle reaches		Нижнее течение Lower reaches		Общее для рек Total	
		N	OM, %	N	OM, %	N	OM, %	N	OM, %
Морквашка Morkvashka	P	2	8,9 ± 5,8	3	6,9 ± 1,1	1	3,2	6	6,9 ± 2,3
	C	0	-	0	-	1	3,8	1	3,8
Морквашинка Morkvashinka	P	8	7,7 ± 0,9	8	6,2 ± 0,4	27	5,8 ± 0,6	43	6,2 ± 0,5
	C	0	-	2	4,8 ± 3,5	20	5,0 ± 0,9	22	5,0 ± 0,7
Почвы водоразделов Near-water-divide surface soils	-	-	-	-	-	-	-	5	13,7 ± 2,7

Примечание. P – бобровые пруды, C – естественное русло без плотин, N – количество образцов, OM – общее содержание органического вещества.

Note. P – beaver ponds, C – natural channel without dams, N – number of samples, OM – total organic matter content.

Таблица 4. Концентрация ТМ в донных отложениях бобровых прудов исследуемых рек на разных участках русла
Table 4. Heavy metals concentration in bottom sediments of the beaver ponds at different sections of the rivers channels

Участки течения River reaches	Cd	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	Mn
Валовое содержание, мг/кг Total content, mg/kg								
Нижнее Lower	0,24 ± 0,05	13,5 ± 1,3	6,5 ± 0,8	14,6 ± 1,3	29,0 ± 1,3	26,2 ± 1,4	12,5 ± 2,1	320,8 ± 8,6
Среднее Middle	0,26 ± 0,07	13,2 ± 2,5	8,9 ± 1,8	16,4 ± 2,1	35,9 ± 3,7	35,9 ± 3,0	22,6 ± 4,2	284,7 ± 73,1
Верхнее Upper	0,30 ± 0,13	10,7 ± 1,4	9,1 ± 1,5	14,4 ± 1,3	31,4 ± 2,3	36,1 ± 3,9	17,7 ± 2,8	386 ± 54,7
В целом Total	0,25 ± 0,04	13,0 ± 1,0	7,3 ± 0,7	14,9 ± 1,0	30,5 ± 1,3	29,4 ± 1,7	15 ± 1,7	325,6 ± 36,4
Подвижные формы, мг/кг Mobile forms, mg/kg								
Нижнее Lower	0,04 ± 0,02	3,7 ± 0,5	0,8 ± 0,1	0,8 ± 0,2	2,1 ± 0,3	0,8 ± 0,2	0,3 ± 0,05	101,7 ± 10
Среднее Middle	0,07 ± 0,05	2,6 ± 0,8	0,9 ± 0,2	0,7 ± 0,5	2,9 ± 0,5	1,1 ± 0,5	0,5 ± 0,2	103,6 ± 27
Верхнее Upper	0,08 ± 0,05	2,5 ± 0,7	0,8 ± 0,2	0,3 ± 0,1	2,9 ± 0,3	2,6 ± 1,3	0,4 ± 0,2	108,5 ± 17,9
В целом Total	0,05 ± 0,02	3,3 ± 0,4	0,8 ± 0,1	0,7 ± 0,2	2,3 ± 0,2	1,2 ± 0,3	0,3 ± 0,1	103,1 ± 8,4
Подвижность, % Mobility, %								
Нижнее Lower	16,1 ± 9,1	27,8 ± 3,7	14,2 ± 2,7	5,1 ± 0,7	7,3 ± 1,1	3,3 ± 0,8	2,2 ± 0,3	34,7 ± 3,7
Среднее Middle	37,6 ± 28,9	21,4 ± 7,3	11,3 ± 4,6	4,3 ± 2,5	8,3 ± 1,8	3,1 ± 1,3	2,3 ± 1,3	37 ± 6,4
Верхнее Upper	40,5 ± 30,5	23,7 ± 6,1	9,5 ± 2,3	2,4 ± 1,2	9,3 ± 1,2	6,8 ± 3	2,5 ± 1,3	28,5 ± 3,7
В целом Total	23,6 ± 9,6	26,1 ± 2,9	12,9 ± 2	4,6 ± 0,7	7,8 ± 0,8	3,8 ± 0,8	2,3 ± 0,4	34 ± 2,9

профилю русла. Незначительные вариации выявлены для валового содержания Co, Zn, Cr, а также для подвижных форм Cd и Zn. Отложения верхних и средних участков водотоков отличаются относительно слабым накоплением указанных металлов в сравнении с их нижним течением. Кроме того, Cd, Pb, Co и Mn характеризуются высокой степенью подвижности в составе отложений, которая выражается в доле металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, от валового их содержания.

Распределение валовых и подвижных форм ТМ в поверхностных отложениях прудов (табл. 5, рис. 3) можно охарактеризовать как равномер-

ное, за исключением Cd и Pb. Так, концентрация Cd в донных отложениях пруда III возрастает от верховий к приплотинной части, а Pb, напротив, уменьшается.

Вариации содержания ТМ в кернах отложений бобрового пруда III весьма несущественны, за редким исключением. В зоне выклинивания подпора наблюдается слабая тенденция уменьшения концентрации металлов с глубиной, помимо подвижных форм Cr. В средней части пруда содержание валовых форм выровнено, кроме Pb и Mn, для которых характерна тенденция к увеличению содержания в глубоких слоях отложений; схожая картина на данном участке выяв-

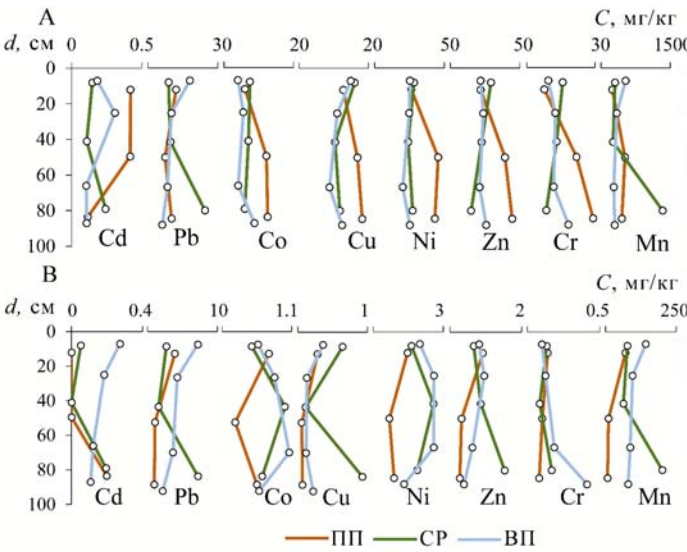


Рис. 3. Изменения концентрации валовых (А) и подвижных (В) форм ТМ в донных отложениях с глубиной на разных участках бобрового пруда III

Fig. 3. Concentration variation in the total (A) and mobile (B) forms of heavy metals in bottom sediments with the depth in different parts of beaver pond III

Таблица 5. Концентрация ТМ (мг/кг) в верхних слоях донных отложений бобрового пруда I (см. рис. 2)

Table 5. Heavy metals concentrations (mg/kg) in near-surface sediments layers of beaver pond I (see Fig. 2)

Участок Location	ПП		СР		ВП	
	Валовое содержание Total content	Подвижные формы Mobile forms	Валовое содержание Total content	Подвижные формы Mobile forms	Валовое содержание Total content	Подвижные формы Mobile forms
ТМ Heavy metals						
Cd	0,16	<0,01	0,15	<0,01	0,19	<0,01
Pb	15,2	4,2	14,6	3,8	14,2	5,1
Co	3,8	0,6	5,1	0,9	4,8	1,2
Cu	13,8	0,9	13,7	0,9	13,6	0,9
Ni	28,3	2,0	28,3	1,8	29,0	1,6
Zn	26,3	0,6	25,4	1,8	26,7	0,7
Cr	11,1	0,2	10,8	0,2	7,8	0,2
Mn	218,2	96,7	231,2	108,1	282,0	142,2

лена и для подвижных форм ТМ. В приплотинной части распределение металлов носит разнонаправленный характер: содержание валовых форм растет с глубиной, подвижных – снижается, кроме Cd. Подобного рода вариации можно объяснить изменением сорбционной способности отложений в отношении металлов в зависимости от их гранулометрического состава и уровней содержания органического вещества в тех или иных разновременных слоях осадка.

Значимое изменение гранулометрического состава, содержания органического вещества и распределения ТМ в отложениях происходит и в зависимости от расстояния от устья исследуемых рек (рис. 4). Содержание валовых форм хорошо коррелирует с содержанием глины/

песка, а также органического вещества. В распределении подвижных форм большую роль играет органическое вещество и менее ощутимую – морфометрические характеристики плотин и прудов (особенно для Zn, Cr).

По результатам RDA-теста выявлено, что наименьшие концентрации валовых форм Cd, Co, Zn характерны для прудов, расположенных в нижнем течении рек, с относительно малым содержанием органического вещества в отложениях; Cu, Ni, Cr, Mn – с высоким содержанием песчаных и низким содержанием глинистых фракций (рис. 5, А). Однако статистически значимыми факторами в распределении данных форм являются количество органики ($F = 7,02$; $p = 0,003$) и глинистых частиц ($F = 11,76$; $p = 0,001$).

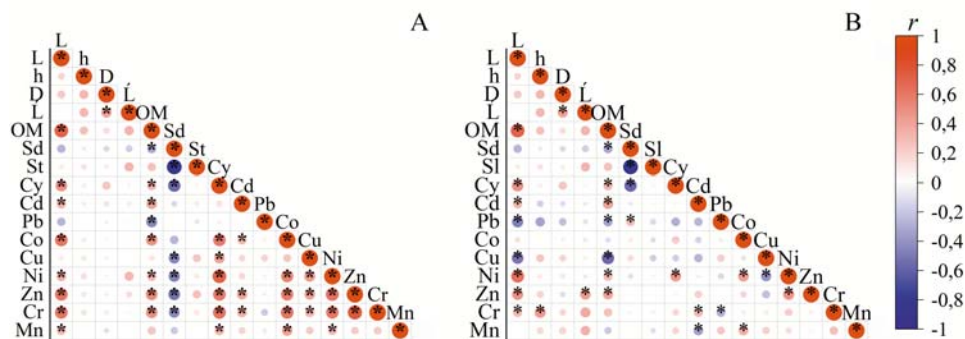


Рис. 4. Корреляционная матрица (коэффициент корреляции Спирмана) содержания валовых (А) и подвижных (В) форм ТМ с гранулометрическим составом, органическим веществом донных отложений прудов, расстоянием от устья и морфометрическими характеристиками плотин и прудов рек Морквашинка и Морквашка.

Здесь и на рис. 5: r – коэффициент корреляции, L – расстояние от устья, h – высота плотин, D – длина плотин, $\bar{L}$ – длина прудов, OM – содержание органического вещества, Sd – содержание песка, Sl – содержание ила, Cy – содержание глины, * – значимость ($p < 0,05$)

Fig. 4. Results of correlation analyses (Spearman's correlation coefficients) of the content of total (A) and mobile (B) forms of heavy metals with the grain size composition, organic matter of pond bottom sediments, the distance from the mouth, and morphometric characteristics of beaver dams and ponds of the Morkvashinka and Morkvashka Rivers.

Here and in Fig. 5: r – correlation coefficient, L – distance from the mouth, h – height of dams, D – length of dams, $\bar{L}$ – length of ponds, OM – organic matter content, Sd – sand content, Sl – silt content, Cy – clay content, * – significance level ($p < 0.05$)

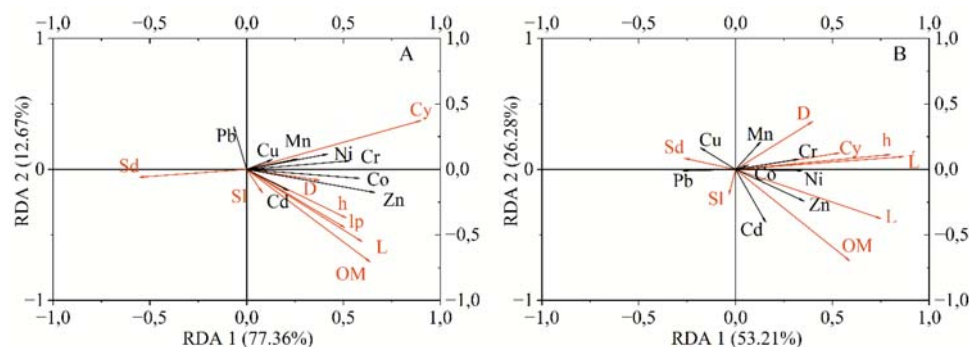


Рис. 5. Результаты RDA-теста: А – валовые и В – подвижные формы тяжелых металлов

Fig. 5. RDA test results: A – total and B – mobile forms of heavy metals

Согласно второй модели (рис. 5, В), распределение подвижных форм ТМ зависит от морфометрических характеристик бобровых прудов и плотин, а также от содержания органического вещества и доли пелитовой фракции. Наибольшие концентрации Ni и Cr характерны для относительно более длинных прудов с высокими и длинными плотинами и высокой долей пелита в осадках, а Zn – для верховьев рек с отложениями, характеризующимися максимальными показателями накопления органического вещества. Статистически значимое влияние получено для следующих факторов: расстояние от устья ($F = 10,08$; $p = 0,004$), длина плотин ($F = 10,00$; $p = 0,009$) и прудов ($F = 18,85$; $p = 0,001$), содержание органического вещества ($F = 3,54$; $p = 0,048$).

Установлено, что донные отложения исследуемых рек характеризуются незначительным накоплением Cd (табл. 6, рис. 6). Концентрация таких элементов, как Co, Cr, Pb, сопоставима, а Cu, Ni, Zn, Mn – ниже их содержания в почвах водоразделов. В целом в донных отложениях бобровых прудов концентрации валовых форм ТМ сопоставимы с содержанием их

в осадках на участках с естественным руслом. Статистически значимые различия выявлены только для Pb ($p = 0,003$) и Cu ($p = 0,018$).

Содержание подвижных форм Pb, Co, Ni, Cu, Cr и Mn в донных отложениях значительно выше (в среднем в 10 раз), а концентрации Cd и Zn сопоставимы или незначительно выше, чем в почвах плакорных территорий Предволжья Республики Татарстан [Иванов, 2023] (табл. 6, рис. 7). Статистически значимые различия между концентрациями металлов в отложениях прудов и естественного русла отсутствуют, за исключением Cd ($p < 0,0001$) и Pb ($p = 0,031$).

Оценка уровня содержания ТМ в донных отложениях рек Морквашка и Морквашинка и расположенных на них прудов в основном показала отсутствие превышений региональных фоновых концентраций [Региональные..., 2019] для валовых форм. Что касается подвижных форм металлов, то в половине и более образцов выявлены превышения содержания Pb, Co, Ni в среднем в 1,1–1,5 раза (рис. 8). Максимальные уровни накопления металлов в донных отложениях р. Морквашинка характерны

Таблица 6. Содержание кислоторастворимых и подвижных форм ТМ в почвах Предволжья Республики Татарстан, мг/кг [Иванов, 2023]

Table 6. The content of acid-soluble and mobile forms of heavy metals in the soils of Pre-Volga region of the Republic of Tatarstan, mg/kg [Ivanov, 2023]

TM Heavy metals	Cd	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	Mn
Валовое содержание Total content	0,33	12,1	11,8	16,1	22,4	45,2	24,8	435,5
Подвижные формы Mobile forms	0,08	0,72	0,07	0,17	0,49	0,63	0,11	14,2

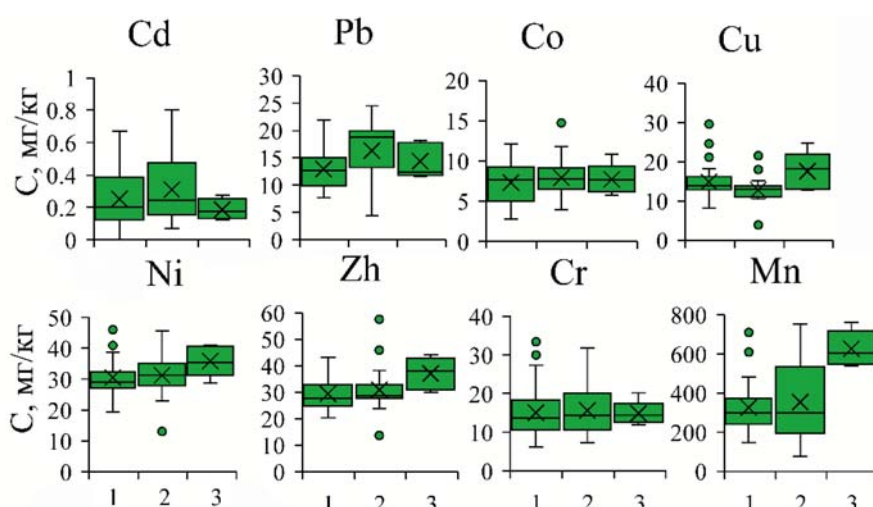


Рис. 6. Содержание валовых форм ТМ в донных отложениях бобровых прудов (1), участков с естественным руслом (2) и в водораздельных почвах (3)

Fig. 6. Total heavy metals content in the bottom sediments of the beaver ponds (1), in natural channel sections (2), and in near-water-divide surface soils (3)

для бобровых прудов, расположенных в среднем ее течении, в непосредственной близости или ниже села Лесные Моркваши, а также у федеральной трассы Р-241 и в верховьях реки на месте разрушенных антропогенных прудов. На р. Морквашка превышения регионального

фона подвижных форм металлов в отложениях отмечены в верховьях, ниже участка впадения правого притока, пересекающего федеральную трассу М-7, и в нижнем течении, где расположены дачные массивы, поселок Пустые Моркваши и город Иннополис.

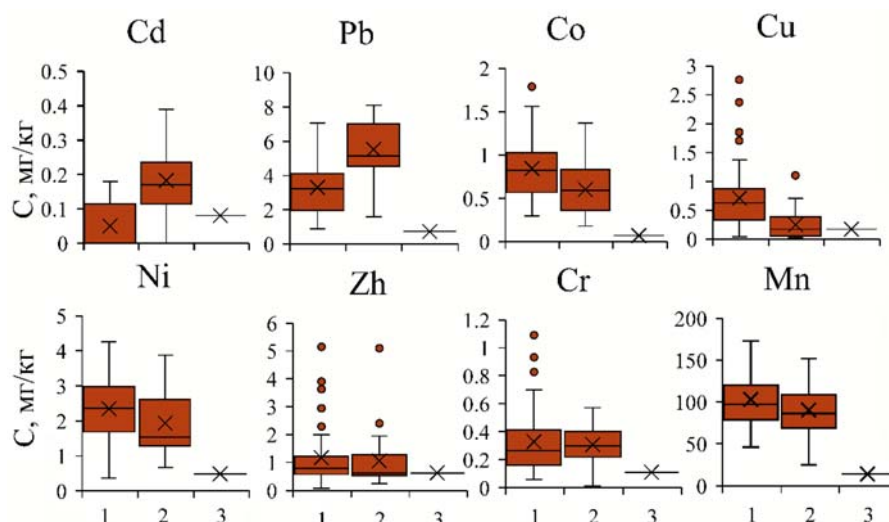


Рис. 7. Содержание подвижных форм ТМ в донных отложениях бобровых прудов (1), на участках с естественным руслом (2) и в приводораздельных почвах (3)

Fig. 7. Heavy metals mobile forms content in the bottom sediments of the beaver ponds (1), in natural channel sections (2), and in near-water-divide surface soils (3)

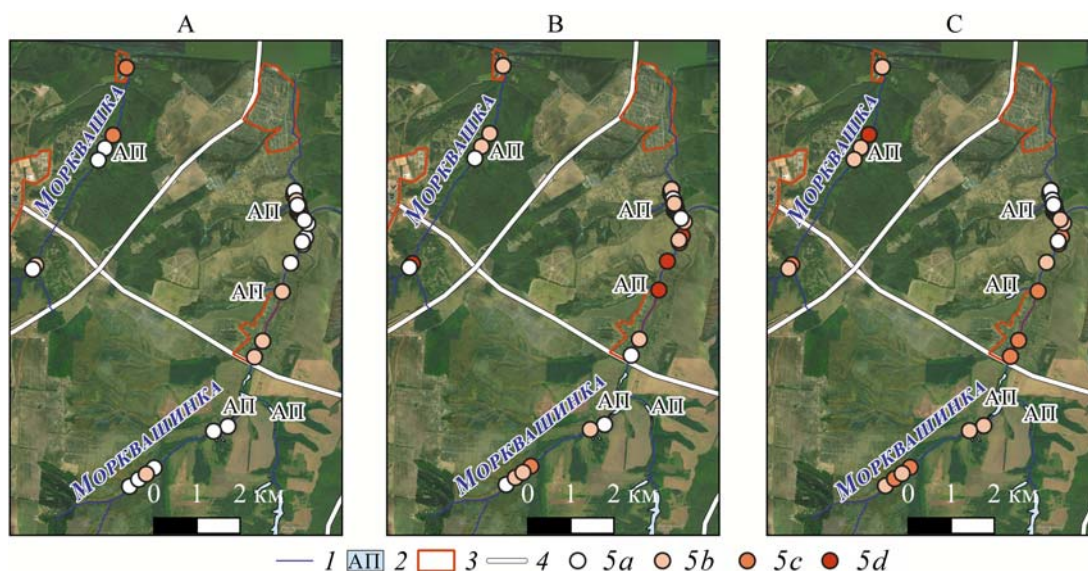


Рис. 8. Бобровые пруды с различным уровнем загрязнения донных отложений подвижными формами Pb (А), Co (В) и Ni (С):

1 – речная сеть, 2 – антропогенные пруды, 3 – населенные пункты, 4 – федеральные трассы, 5 – превышения концентрации подвижных форм ТМ относительно фоновых значений в донных отложениях рек и водохранилищ Республики Татарстан (а – не превышает, b – в 1,5 раза, c – в 1,5–2 раза, d – в 2–3 раза)

Fig. 8. Beaver ponds with different levels of bottom sediments contamination with mobile forms of Pb (A), Co (B), and Ni (C):

1 – river network, 2 – man-made ponds, 3 – settlements, 4 – federal highways, 5 – exceeded concentration of mobile forms of heavy metals relative to the background values of bottom sediments in rivers and reservoirs of the Republic of Tatarstan (a – does not exceed, b – by 1.5 times, c – by 1.5–2 times, d – by 2–3 times)

Заключение

Изучение состава донных отложений бобровых прудов малых рек Морквашинка и Морквашка, расположенных на крайнем севере Приволжской возвышенности Русской равнины, позволило оценить уровень содержания в них валовых и подвижных форм ТМ. Верхние и средние участки водотоков отличаются несколько более высоким содержанием валовых форм Co, Zn и Cr, а также подвижных форм Cd и Zn по сравнению с нижним течением. Выявлена высокая степень подвижности таких элементов, как Cd, Pb, Co и Mn. Наиболее важными факторами в распределении валовых ТМ являются расстояние от устья, гранулометрический состав, содержание органического вещества, а также длина плотин и прудов. Установлено, что концентрация валовых форм Cd незначительно, а подвижных форм Pb, Co, Ni, Cu, Cr, Mn в несколько раз (иногда и на порядок величины) выше их содержания в почвах водоразделов. В целом в донных отложениях бобровых прудов концентрации валовых форм ТМ сопоставимы с содержанием их в осадках на участках с естественным руслом без плотин. Более чем в половине исследованных образцов отложений выявлены превышения фонового содержания, в среднем в 1,1–1,5 раза, подвижных форм Pb, Co и Ni.

Литература

- Башинский И. В., Осипов В. В. Скорость осаждения и химический состав взвешенного вещества в бобровых водоемах на территории заповедника «Приволжская лесостепь» (Европейская Россия) // *Nature Conservation Research. Заповедная наука*. 2019. Т. 4, № 3. С. 54–66. doi: 10.24189/ncr.2019.046
- Бутаков Г. П. От Казани до устья Свияги // *Средняя Волга* / Ред. А. П. Дедков. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1991. С. 41–48.
- ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
- Ермолаев О. П., Игонин М. Е., Бубнов А. Ю., Павлова С. В. Ландшафты Республики Татарстан. Региональный ландшафтно-экологический анализ / Под ред. О. П. Ермолаева, Казань: Слово, 2007. 411 с.
- Иванов Д. В. Фоновое содержание загрязняющих веществ в депонирующих средах: методология нормирования и оценка уровня загрязненности почв и донных отложений на региональном уровне: Дис. ... докт. геогр. наук. Казань, 2023. 296 с.
- Иванов М. М., Голосов В. Н., Иванова Н. Н. Баланс наносов и миграция ^{137}Cs в зоне чернобыльского загрязнения: опыт и итоги исследований в бассейне р. Плавы, Тульская область // *Геоморфология и палеогеография*. 2023. Т. 54, №. 1. С. 55–73. doi: 10.31857/S294917892301005X
- ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.32-02. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания сухого и прокаленного остатка в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях гравиметрическим методом.
- ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами.
- Региональные нормативы «Фоновое содержание тяжелых металлов в донных отложениях поверхностных водных объектов Республики Татарстан» (утв. Приказом Министерства экологии и природных ресурсов РТ от 27.03.2019).
- Шарифуллин А. Г., Гусаров А. В. Особенности современных эрозионно-аккумулятивных процессов на серых лесных почвах ложбин малого водосбора Республики Татарстан // *Почвоведение*. 2022. №. 1. С. 133–144. doi: 10.31857/S0032180X22010117
- Шарифуллин А. Г., Гусаров А. В., Голосов В. Н. Современный тренд эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распаханном водосборе, Республика Татарстан // *Геоморфология*. 2018. №. 3. С. 93–108. doi: 10.7868/S0435428118030082
- Bason C. W., Kroes D. E., Brinson M. M. The effect of beaver ponds on water quality in rural coastal plain streams // *Southeast. Nat.* 2017. Vol. 16, no. 4. P. 584–602. doi: 10.1656/058.016.0408
- Błędzki L. A., Bubier J. L., Moulton L. A., Kyker-Snowman T. D. Downstream effects of beaver ponds on the water quality of New England first- and second-order streams // *Ecohydrology*. 2011. Vol. 4, no. 5. P. 698–707. doi: 10.1002/eco.163
- Brazier R. E., Puttock A., Graham H. A., Auster R. E., Davies K. H., Brown C. M. L. Beaver: Nature's ecosystem engineers // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2021. Vol. 8, no. 1. e1494. doi: 10.1002/wat2.1494
- Butler D. R., Malanson G. P. The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams // *Geomorphology*. 2005. Vol. 71, no. 1–2. P. 48–60. doi: 10.1016/j.geomorph.2004.08.016
- Cafaro P. Reducing human numbers and the size of our economies is necessary to avoid a mass extinction and share Earth justly with other species // *Philosophia*. 2022. Vol. 50, no. 5. P. 2263–2282. doi: 10.1007/s11406-022-00497-w
- Çevik F., Göksu M. Z. L., Derici O. B., Findik Ö. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses // *Environ. Monit. Assess.* 2009. Vol. 152, no. 1–4. P. 309–317. doi: 10.1007/s10661-008-0317-3
- Čiuldienė D., Vigras E., Belova O., Aleinikovas M., Armolaitis K. The effect of beaver dams on organic carbon, nutrients and methyl mercury distribution in impounded waterbodies // *Wildl. Biol.* 2020. Vol. 3. P. 1–8. doi: 10.1111/wlb.00678
- Crist E., Mora C., Engelman R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection // *Science*. 2017. Vol. 356, no. 6335. P. 260–264. doi: 10.1126/science.aal201

- Devito K. J., Dillon P. J., Lazerte B. D. Phosphorus and nitrogen retention in five Precambrian shield wetlands // *Biogeochem.* 1989. Vol. 8, no. 3. P. 185–204. doi: 10.1007/BF00002888
- Dietrich M., Ayers J. Geochemical partitioning and possible heavy metal(loid) bioaccumulation within aquaculture shrimp ponds // *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 788. Art. 147777. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147777
- Dinis M. L., Fiúza A., Góis J., de Carvalho J. S., Meira Castro A. C. Assessment of natural radioactivity, heavy metals and particulate matter in air and soil around a coal-fired power plant – An integrated approach // *Atmosphere.* 2021. Vol. 12, no. 11. P. 1433. doi: 10.3390/atmos12111433
- Du Laing G., Rinklebe J., Vandecasteele B., Meers E., Tack F. M. G. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review // *Sci. Total Environ.* 2009. Vol. 407, no. 13. P. 3972–3985. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.025
- Duan L., Song J., Xu Y., Li X., Zhang Y. The distribution, enrichment and source of potential harmful elements in surface sediments of Bohai Bay, North China // *J. Hazard. Mater.* 2010. Vol. 183, no. 1–3. P. 155–164. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.005
- Egemose S., Sønderup M. J., Grudinina A., Hansen A. S., Flindt M. R. Heavy metal composition in stormwater and retention in ponds dependent on pond age, design and catchment type // *Environ. Technol.* 2015. Vol. 36, no. 8. P. 959–969. doi: 10.1080/09593330.2014.970584
- Fletcher D. E., Lindell B. E., Lindell A. H., Stankus P. T., Fletcher N. D., McArthur J. V., Seaman J. C. Basins, beaver ponds, and the storage and redistribution of trace elements in an industrially impacted coastal plain stream on the Savannah River Site, SC, USA // *Environ. Int.* 2019. Vol. 133. Art. 105174. doi: 10.1016/j.envint.2019.105174
- Gatti R. C., Callaghan T. V., Rozhkova-Timina I., Dudko A., Lim A., Vorobyev S. N., Kirpotin S. N., Pokrovsky O. S. The role of Eurasian beaver (*Castor fiber*) in the storage, emission and deposition of carbon in lakes and rivers of the River Ob flood plain, western Siberia // *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 644. P. 1371–1379. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.042
- Ghrefat H., Yusuf N. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan // *Chemosphere.* 2006. Vol. 65, no. 11. P. 2114–2121. doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.06.043
- Gimeno-García E., Andreu V., Boluda R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils // *Environ. Pollut.* 1996. Vol. 92, no. 1. P. 19–25. doi: 10.1016/0269-7491(95)00090-9
- Goldhaber S. B. Trace element risk assessment: essentiality vs. toxicity // *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 2003. Vol. 38, no. 2. P. 232–242. doi: 10.1016/S0273-2300(02)00020-X
- Gołdyn B., Chudzińska M., Barańkiewicz D., Celewicz-Gołdyn S. Heavy metal contents in the sediments of astatic ponds: Influence of geomorphology, hydroperiod, water chemistry and vegetation // *Eco-toxicol. Environ. Safety.* 2015. Vol. 118. P. 103–111. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.04.016
- Green K. C., Westbrook C. J. Changes in riparian area structure, channel hydraulics, and sediment yield following loss of beaver dams // *J. Ecosyst. Manag.* 2009. Vol. 10, no. 1. P. 68–79. doi: 10.22230/jem.2009v10n1a412
- Gusarov A. V., Sharifullin A. G., Beylich A. A., Lisetskii F. N. Features of the distribution of beaver dams and ponds along small rivers: The Volga-Kama Region, European Russia // *Hydrology.* 2024. Vol. 11, no. 4. P. 53. doi: 10.3390/hydrology11040053
- Hostetler C. E., Kincaid R. L., Mirando M. A. The role of essential trace elements in embryonic and fetal development in livestock // *Vet. J.* 2003. Vol. 166, no. 2. P. 125–139. doi: 10.1016/S1090-0233(02)00310-6
- Hou D., O'Connor D., Igalavithana A. D., Alessi D. S., Luo J., Tsang D. C. W., Sparks D. L., Yamauchi Y., Rinklebe J., Ok Y. S. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability // *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020. Vol. 1, no. 7. P. 366–381. doi: s43017-020-0061-y
- Jacob J. M., Karthik C., Saratale R. G., Kumar S. S., Prabakar D., Kadirvelu K., Pugazhendhi A. Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature // *J. Environ. Manag.* 2018. Vol. 217. P. 56–70. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.03.077
- Jiao W., Ouyang W., Hao F., Lin C. Anthropogenic impact on diffuse trace metal accumulation in river sediments from agricultural reclamation areas with geochemical and isotopic approaches // *Sci. Total Environ.* 2015. Vol. 536. P. 609–615. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.118
- Kalvite Z., Lībiēte Z., Kļaviņš I., Bārdule A., Bičkovskis K. The impact of beaver dam removal on the chemical properties of water in drainage ditches in peatland forests // *Scand. J. Forest Res.* 2021. Vol. 36, no. 1. P. 1–14. doi: 10.1080/02827581.2020.1855364
- Katsman E. A., Suzdaleva A. L., Osipov V. V., Bashinskiy I. V. Concentrations of biogenic compounds in forest-steppe water bodies and streams inhabited by beavers (*Castor fiber* L.) // *Russ. J. Biol. Invas.* 2020. Vol. 11. P. 31–40. doi: 10.1134/S2075111720010063
- Klotz R. L. Influence of beaver ponds on the phosphorus concentration of stream water // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1998. Vol. 55, no. 5. P. 1228–1235. doi: 10.1139/f97-318
- Klotz R. L. Reduction of high nitrate concentrations in a Central New York State Stream impounded by beaver // *Northeast. Nat.* 2010. Vol. 17, no. 3. P. 349–356. doi: 10.1656/045.017.0301
- Larsen A., Larsen J. R., Lane S. N. Dam builders and their works: Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems // *Earth-Sci. Rev.* 2021. Vol. 218. P. 103623. doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103623
- Law A., McLean F., Willby N. J. Habitat engineering by beaver benefits aquatic biodiversity and ecosystem processes in agricultural streams // *Freshwat. Biol.* 2016. Vol. 61, no. 4. P. 486–499. doi: 10.1111/fwb.12721
- Leclerc A., Laurent A. Framework for estimating toxic releases from the application of manure on agricultural soil: National release inventories for heavy metals in

2000–2014 // *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 590–591. P. 452–460. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.117

Levanoni O., Bishop K., Mckie B. G., Hartman G., Eklöf K., Ecke F. Impact of beaver pond colonization history on methylmercury concentrations in surface water // *Environ. Sci. Technol.* 2015. Vol. 49, no. 21. P. 12679–12687. doi: 10.1021/acs.est.5b03146

Mertz W. The essential trace elements // *Science*. 1981. Vol. 213, no. 4514. P. 1332–1338. doi: 10.1126/science.7022654

Mora C. Revisiting the environmental and socio-economic effects of population growth: a fundamental but fading issue in modern scientific, public, and political circles // *Ecol. Soc.* 2014. Vol. 19, no. 1. Art. 38. doi: 10.5751/ES-06320-190138

Naz S., Fazio F., Habib S. S., Nawaz G., Attaullah S., Ullah M., Hayat A., Ahmed I. Incidence of heavy metals in the application of fertilizers to crops (wheat and rice), a fish (Common carp) pond and a human health risk assessment // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 20. Art. 13441. doi: 10.3390/su142013441

Neumayer M., Teschemacher S., Schloemer S., Zahner V., Rieger W. Hydraulic modeling of beaver dams and evaluation of their impacts on flood events // *Water*. 2020. Vol. 12, no. 1. Art. 300. doi: 10.3390/w12010300

N'guessan Y. M., Probst J. L., Bur T., Probst A. Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): Where do they come from? // *Sci. Total Environ.* 2009. Vol. 407, no. 8. P. 2939–2952. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.12.047

Nyssen J., Pontzele J., Billi P. Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Chevral in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium // *J. Hydrol.* 2011. Vol. 402, no. 1–2. P. 92–102. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.008

Otyukova N. G. Some aspects of the hydrochemical regime of a small river under the conditions of zoogenic disturbance // *Water Resources*. 2009. Vol. 36. P. 604–609. doi: 10.1134/S0097807809050133

Pollock M. M., Lewallen G., Woodruff K., Jordan C. E., Castro J. M. The beaver restoration guidebook: Working with beaver to restore streams, wetlands, and floodplains, version 2.0 / United States Fish and Wildlife Service. 2017.

Puttock A., Graham H. A., Carless D., Brazier R. E. Sediment and nutrient storage in a beaver engineered wetland // *Earth Surf. Process. Landf.* 2018. Vol. 43, no. 11. P. 2358–2370. doi: 10.1002/esp.4398

Sharifullin A. G., Gusarov A. V., Lavrova O. A., Beylich A. A. Channel gradient as a factor in the distribution of beaver dams and ponds on small rivers: A case study in the Northern extremity of the Volga Upland, the East European Plain // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 13. Art. 2491. doi: 10.3390/w15132491

Stout T. L., Majerova M., Neilson B. T. Impacts of beaver dams on channel hydraulics and substrate characteristics in a mountain stream // *Ecohydrology*. 2017. Vol. 10, no. 1. Art. 1767. doi: 10.1002/eco.1767

Tokar' E., Kuzmenkova N., Rozhkova A., Egorin A., Shlyk D., Shi K., Hou X., Kalmykov S. Migration features and regularities of heavy metals transformation in fresh and marine ecosystems (Peter the Great Bay and

Lake Khanka) // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 12. Art. 2267. doi: 10.3390/w15122267

Wang M., Zhang H. Accumulation of heavy metals in roadside soil in urban area and the related impacting factors // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018. Vol. 15, no. 6. P. 1064. doi: 10.3390/ijerph15061064

Washington H., Kopnina H. Discussing the silence and denial around population growth and its environmental impact. How do we find ways forward? // *World*. 2022. Vol. 3, no. 4. P. 1009–1027. doi: 10.3390/world3040057

Wei B., Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China // *Microchem. J.* 2010. Vol. 94, no. 2. P. 99–107. doi: 10.1016/j.microc.2009.09.014

Wohl E. Landscape-scale carbon storage associated with beaver dams // *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40, no. 14. P. 3631–3636. doi: 10.1002/grl.50710

Wohl E. Legacy effects of loss of beavers in the continental United States // *Environ. Res. Lett.* 2021. Vol. 16, no. 2. Art. 25010. doi: 10.1088/1748-9326/abd34e

Wu X., Probst A. Influence of ponds on hazardous metal distribution in sediments at a catchment scale (agricultural critical zone, S-W France) // *J. Hazard. Mater.* 2021. Vol. 411. Art. 125077. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125077

Zhuang P., Zou B., Li N. Y., Li Z. A. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health // *Environ. Geochem. Health*. 2009. Vol. 31. P. 707–715. doi: 10.1007/s10653-009-9248-3

References

Bashinskii I. V., Osipov V. V. Sedimentation rate of suspended matter and its chemical composition in beaver water bodies in the Privolzhskaya Lesostep State Nature Reserve (European Russia). *Nat. Conserv. Res.* 2019;4(3):54–66. (In Russ.). doi: 10.24189/ncr.2019.046

Bason C. W., Kroes D. E., Brinson M. M. The effect of beaver ponds on water quality in rural coastal plain streams. *Southeast. Nat.* 2017;16(4):584–602. doi: 10.1656/058.016.0408

Błędzki L. A., Bubier J. L., Moulton L. A., Kyker-Snowman T. D. Downstream effects of beaver ponds on the water quality of New England first- and second-order streams. *Ecohydrology*. 2011;4(5):698–707. doi: 10.1002/eco.163

Brazier R. E., Puttock A., Graham H. A., Auster R. E., Davies K. H., Brown C. M. L. Beaver: Nature's ecosystem engineers. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2021;8(1):e1494. doi: 10.1002/wat2.1494

Butakov G. P. From Kazan to the mouth of the Sviyaga River. *Srednyaya Volga = Middle Volga*. Kazan: Kazan. Univ.; 1991. P. 41–48. (In Russ.)

Butler D. R., Malanson G. P. The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams. *Geomorphology*. 2005;71(1–2):48–60. doi: 10.1016/j.geomorph.2004.08.016

Cafaro P. Reducing human numbers and the size of our economies is necessary to avoid a mass

- extinction and share Earth justly with other species. *Philosophia*. 2022;50(5):2263–2282. doi: 10.1007/s11406-022-00497-w
- Çevik F., Göksu M. Z. L., Derici O. B., Findik Ö. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses. *Environ. Monit. Assess.* 2009;152(1–4):309–317. doi: 10.1007/s10661-008-0317-3
- Čiuldienė D., Vigras E., Belova O., Aleinikovas M., Armolaitis K. The effect of beaver dams on organic carbon, nutrients and methyl mercury distribution in impounded waterbodies. *Wildl. Biol.* 2020;3:1–8. doi: 10.1111/wlb.00678
- Crist E., Mora C., Engelman R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science*. 2017;356(6335):260–264. doi: 10.1126/science.aal201
- Devito K. J., Dillon P. J., Lazerte B. D. Phosphorus and nitrogen retention in five Precambrian shield wetlands. *Biogeochem.* 1989;8(3):185–204. doi: 10.1007/BF00002888
- Dietrich M., Ayers J. Geochemical partitioning and possible heavy metal(loid) bioaccumulation within aquaculture shrimp ponds. *Sci. Total Environ.* 2021;788:147777. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147777
- Dinis M. L., Fiúza A., Góis J., de Carvalho J. S., Meira Castro A. C. Assessment of natural radioactivity, heavy metals and particulate matter in air and soil around a coal-fired power plant – An integrated approach. *Atmosphere*. 2021;12(11):1433. doi: 10.3390/atmos12111433
- Du Laing G., Rinklebe J., Vandecasteele B., Meers E., Tack F. M. G. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review. *Sci. Total Environ.* 2009;407(13):3972–3985. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.025
- Duan L., Song J., Xu Y., Li X., Zhang Y. The distribution, enrichment and source of potential harmful elements in surface sediments of Bohai Bay, North China. *J. Hazar. Mater.* 2010;183(1–3):155–164. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.005
- Egemose S., Sønderup M. J., Grudinina A., Hansen A. S., Flindt M. R. Heavy metal composition in storm-water and retention in ponds dependent on pond age, design and catchment type. *Environ. Technol.* 2015;36(8):959–969. doi: 10.1080/09593330.2014.970584
- Ermolaev O. P., Igonin M. E., Bubnov A. Yu., Pavlova S. V. Landscapes of the Republic of Tatarstan. Regional landscape-ecological analysis. Kazan: Slovo; 2007. 411 p. (In Russ.)
- Fletcher D. E., Lindell B. E., Lindell A. H., Stanek P. T., Fletcher N. D., McArthur J. V., Seaman J. C. Basins, beaver ponds, and the storage and redistribution of trace elements in an industrially impacted coastal plain stream on the Savannah River Site, SC, USA. *Environ. Int.* 2019;133:105174. doi: 10.1016/j.envint.2019.105174
- Gatti R. C., Callaghan T. V., Rozhkova-Timina I., Dudko A., Lim A., Vorobyev S. N., Kirpotin S. N., Pokrovsky O. S. The role of Eurasian beaver (*Castor fiber*) in the storage, emission and deposition of carbon in lakes and rivers of the River Ob flood plain, western Siberia. *Sci. Total Environ.* 2018;644:1371–1379. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.042
- Ghrefat H., Yusuf N. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan. *Chemosphere*. 2006;65(11):2114–2121. doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.06.043
- Gimeno-García E., Andreu V., Boluda R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. *Environ. Pollut.* 1996;92(1):19–25. doi: 10.1016/0269-7491(95)00090-9
- Goldhaber S. B. Trace element risk assessment: essentiality vs. toxicity. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 2003;38(2):232–242. doi: 10.1016/S0273-2300(02)00020-X
- Goldyn B., Chudzińska M., Barańkiewicz D., Celewicz-Goldyn S. Heavy metal contents in the sediments of astatic ponds: Influence of geomorphology, hydroperiod, water chemistry and vegetation. *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2015;118:103–111. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.04.016
- GOST 12536-2014; Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. (In Russ.)
- Green K. C., Westbrook C. J. Changes in riparian area structure, channel hydraulics, and sediment yield following loss of beaver dams. *J. Ecosyst. Manag.* 2009;10(1):68–79. doi: 10.22230/jem.2009v10n1a412
- Gusarov A. V., Sharifullin A. G., Beylich A. A., Lisetskii F. N. Features of the distribution of beaver dams and ponds along small rivers: The Volga-Kama Region, European Russia. *Hydrology*. 2024;11(4):53. doi: 10.3390/hydrology11040053
- Hostettler C. E., Kincaid R. L., Mirando M. A. The role of essential trace elements in embryonic and fetal development in livestock. *Vet. J.* 2003;166(2):125–139. doi: 10.1016/S1090-0233(02)00310-6
- Hou D., O'Connor D., Igalavithana A. D., Alessi D. S., Luo J., Tsang D. C. W., Sparks D. L., Yamauchi Y., Rinklebe J., Ok Y. S. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020;1(7):366–381. doi: 10.1038/s43017-020-0061-y
- Ivanov D. V. Background content of pollutants in depositions: methodology and assessment of soil and bottom sediments contamination level at the regional level: DSc (Dr. of Geog.) thesis. Kazan; 2023. 296 p. (In Russ.)
- Ivanov M. M., Golosov V. N., Ivanova N. N. The sediment budget and migration of ¹³⁷Cs in Chernobyl affected area: 30 years of investigations in the Plava River basin, Tula Region. *Geomorfologiya i paleogeografiya = Geomorphology and Paleogeography*. 2023;54(1):55–73. (In Russ.). doi:10.31857/S294917892301005X
- Jacob J. M., Karthik C., Saratale R. G., Kumar S. S., Prabakar D., Kadirvelu K., Pugazhendhi A. Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature. *J. Environ. Manag.* 2018;217:56–70. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.03.077
- Jiao W., Ouyang W., Hao F., Lin C. Anthropogenic impact on diffuse trace metal accumulation in river sediments from agricultural reclamation areas with geochemical and isotopic approaches.

- Sci. Total Environ.* 2015;536:609–615. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.118
- Kalvite Z., Lībiete Z., Kļaviņš I., Bārdule A., Bičkovskis K. The impact of beaver dam removal on the chemical properties of water in drainage ditches in peatland forests. *Scandin. J. Forest Res.* 2021;36(1):1–14. doi: 10.1080/02827581.2020.1855364
- Katsman E. A., Suzdaleva A. L., Osipov V. V., Bashinskiy I. V. Concentrations of biogenic compounds in forest-steppe water bodies and streams inhabited by beavers (*Castor fiber* L.). *Russ. J. Biol. Invas.* 2020;11:31–40. doi: 10.1134/S2075111720010063
- Klotz R. L. Influence of beaver ponds on the phosphorus concentration of stream water. *Can. J. Fisher. Aquat. Sci.* 1998;55(5):1228–1235. doi: 10.1139/f97-318
- Klotz R. L. Reduction of high nitrate concentrations in a Central New York State Stream impounded by beaver. *Northeast. Nat.* 2010;17(3):349–356. doi: 10.1656/045.017.0301
- Larsen A., Larsen J. R., Lane S. N. Dam builders and their works: Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems. *Earth-Sci. Rev.* 2021;218:103623. doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103623
- Law A., McLean F., Willby N. J. Habitat engineering by beaver benefits aquatic biodiversity and ecosystem processes in agricultural streams. *Freshwat. Biol.* 2016;61(4):486–499. doi: 10.1111/fwb.12721
- Leclerc A., Laurent A. Framework for estimating toxic releases from the application of manure on agricultural soil: National release inventories for heavy metals in 2000–2014. *Sci. Total Environ.* 2017;590–591:452–460. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.117
- Levanoni O., Bishop K., Mckie B.G., Hartman G., Eklöf K., Ecke F. Impact of beaver pond colonization history on methylmercury concentrations in surface water. *Environ. Sci. Technol.* 2015;49(21):12679–12687. doi: 10.1021/acs.est.5b03146
- Mertz W. The essential trace elements. *Science.* 1981;213(4514):1332–1338. doi: 10.1126/science.7022654
- Mora C. Revisiting the environmental and socioeconomic effects of population growth: a fundamental but fading issue in modern scientific, public, and political circles. *Ecol. Soc.* 2014;19(1):38. doi: 10.5751/ES-06320-190138
- Naz S., Fazio F., Habib S. S., Nawaz G., Attaullah S., Ullah M., Hayat A., Ahmed I. Incidence of heavy metals in the application of fertilizers to crops (wheat and rice), a fish (Common carp) pond and a human health risk assessment. *Sustainability.* 2022;14(20):13441. doi: 10.3390/su142013441
- Neumayer M., Teschemacher S., Schloemer S., Zahner V., Rieger W. Hydraulic modeling of beaver dams and evaluation of their impacts on flood events. *Water.* 2020;12(1):300. doi: 10.3390/w12010300
- N'guessan Y. M., Probst J. L., Bur T., Probst A. Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): Where do they come from? *Sci. Total Environ.* 2009;407(8):2939–2952. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.12.04
- Nyssen J., Pontzele J., Billi P. Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Chevral in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium. *J. Hydrol.* 2011;402(1–2):92–102. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.008
- Otyukova N. G. Some aspects of the hydrochemical regime of a small river under the conditions of zoogenic disturbance. *Water Resources.* 2009;36:604–609. doi: 10.1134/S0097807809050133
- PND F 16.2.2:2.3:3.32-02. Quantitative chemical analysis of soil. Methods for measuring the content of dry and calcined residue in solid and liquid wastes of production and consumption, sediments, sludge, activated sludge, bottom sediments by the gravimetric method. (In Russ.)
- PND F 16.2.2:2.3.71-2011. Quantitative chemical analysis of soil. Methods for measuring the mass fraction of metals sewage sludge, sediments, and plant samples using spectral methods. (In Russ.)
- Pollock M. M., Lewallen G., Woodruff K., Jordan C. E., Castro J. M. The beaver restoration guidebook: Working with beaver to restore streams, wetlands, and floodplains, version 2.0. United States Fish and Wildlife Service. 2017.
- Puttock A., Graham H. A., Carless D., Brazier R. E. Sediment and nutrient storage in a beaver engineered wetland. *Earth Surf. Process. Landf.* 2018;43(11):2358–2370. doi: 10.1002/esp.4398
- Regional standards 'Background content of heavy metals in bottom sediments of surface water bodies of the Republic of Tatarstan' (approved by the Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Tatarstan dated 27.03.2019) (In Russ.)
- Sharifullin A. G., Gusarov A. V. Contemporary erosion and sedimentation on gray forest soils in hollows of small catchments of the Republic of Tatarstan, European Russia. *Eurasian Soil Sci.* 2022;55:115–125. doi: 10.1134/S1064229322010112
- Sharifullin A. G., Gusarov A. V., Golosov V. N. Assessment of contemporary erosion/sedimentation trend within a small cultivated catchment in the Republic of Tatarstan (European Russia). *Geomorfologiya = Geomorphology.* 2018;3:93–108. (In Russ.). doi: 10.7868/S0435428118030082
- Sharifullin A. G., Gusarov A. V., Lavrova O. A., Beylich A. A. Channel gradient as a factor in the distribution of beaver dams and ponds on small rivers: A case study in the Northern extremity of the Volga Upland, the East European Plain. *Water.* 2023;15(13):2491. doi: 10.3390/w15132491
- Stout T. L., Majerova M., Neilson B. T. Impacts of beaver dams on channel hydraulics and substrate characteristics in a mountain stream. *Ecohydrology.* 2017;10(1):e1767. doi: 10.1002/eco.1767
- Tokar' E., Kuzmenkova N., Rozhkova A., Egorin A., Shlyk D., Shi K., Hou X., Kalmykov S. Migration features and regularities of heavy metals transformation in fresh and marine ecosystems (Peter the Great Bay and Lake Khanka). *Water.* 2023;15(12):2267. doi: 10.3390/w15122267
- Wang M., Zhang H. Accumulation of heavy metals in roadside soil in urban area and the related

impacting factors. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018;15(6):1064. doi: 10.3390/ijerph15061064

Washington H., Kopnina H. Discussing the silence and denial around population growth and its environmental impact. How do we find ways forward? *World*. 2022;3(4):1009–1027. doi: 10.3390/world3040057

Wei B., Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchem. J.* 2010;94(2):99–107. doi: 10.1016/j.microc.2009.09.014

Wohl E. Landscape-scale carbon storage associated with beaver dams. *Geophys. Res. Lett.* 2013;40(14):3631–3636. doi: 10.1002/grl.50710

Wohl E. Legacy effects of loss of beavers in the continental United States. *Environ. Res. Lett.* 2021;16(2):25010. doi: 10.1088/1748-9326/abd34e

Wu X., Probst A. Influence of ponds on hazardous metal distribution in sediments at a catchment scale (agricultural critical zone, S-W France). *J. Hazard. Mater.* 2021;411:125077. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125077

Zhuang P., Zou B., Li N. Y., Li Z. A. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health. *Environ. Geochem. Health*. 2009;31:707–715. doi: 10.1007/s10653-009-9248-3

Поступила в редакцию / received: 10.03.2025; принята к публикации / accepted: 14.03.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шарифуллин Айдар Гамисович

канд. геогр. наук, доцент кафедры ландшафтной экологии Института экологии и природопользования

e-mail: AGSharifullin@kpfu.ru

Гусаров Артем Викторович

канд. геогр. наук, доцент, старший научный сотрудник НИЦ «Цифровая Земля» Института геологии и нефтегазовых технологий

e-mail: avgusarov@mail.ru

Иванов Дмитрий Владимирович

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

e-mail: water-rf@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Sharifullin, Aidar

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor of the Department of Landscape Ecology of the Institute of Environmental Sciences

Gusarov, Artyom

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor, Senior Researcher, Digital Earth Research Center of the Institute of Geology and Petroleum Technologies

Ivanov, Dmitry

Dr. Sci. (Geog.), Deputy Director

УДК 574.5

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАЗНООБРАЗИЯ РЫБНОГО НАСЕЛЕНИЯ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА

Г. Т. Фрумин^{1*}, С. Г. Михалап²

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена (наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186), gfrumin@mail.ru

² Псковский филиал ФГБНУ «ПсковНИРО» (ул. Максима Горького, 13, Псков, Россия, 180007)

Статья связана с актуальной проблемой сокращения биологического разнообразия и подходами к его оценке на примере рыбного населения Псковского озера. Материалом для анализа изменений структуры рыбной части озерного сообщества послужила рыбопромысловая статистика за период 1960–2023 гг. Для математико-статистического анализа массив первичных данных промышленного вылова рыб был разделен на пятилетние периоды. Структура уловов при многолетних рядах наблюдений, несмотря на селективность промысла, достаточно адекватно отражает динамику рыбного населения и изменение его видового разнообразия, представленного составом уловов и соотношением биомасс разных видов рыб. Однако достоверность оценки тенденции снижения разнообразия остается неоднозначным вопросом при применении разных индексов биоразнообразия. Поэтому целью данной работы являлся сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия для оценки динамики видового разнообразия рыбного населения Псковского озера. Использовались шесть следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского (μ), индекс Симпсона – индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D). Приведена матрица парных корреляций индексов биоразнообразия, примененных для оценки динамики разнообразия видовой структуры рыбного населения Псковского озера. Установлена наибольшая информативность индексов Симпсона – доминирования и разнообразия (C и D). С 1960 по 2023 г. величина индекса биоразнообразия Симпсона увеличилась от 3,70 до 5,88 и характеризуется высоким положительным трендом (по шкале Чеддока коэффициент корреляции $r = 0,85$). Кроме того, применение индекса биоразнообразия Симпсона позволило выявить влияние абиотических факторов на динамику разнообразия рыбного населения Псковского озера. Для периода 2000–2023 гг. построены следующие математические модели: индекс биоразнообразия Симпсона – уровень озера, температура воды, концентрация фосфора валового, биохимическое потребление кислорода в течение пяти суток, химическое потребление кислорода. Выявлена адекватная зависимость между индексом биоразнообразия Симпсона и концентрациями фосфора валового в воде озера, что отражает негативное влияние процесса эвтрофирования на рыбное население Псковского озера.

Ключевые слова: Псковское озеро; рыбное население; динамика видового разнообразия; индексы биоразнообразия; математические модели; абиотические факторы

Для цитирования. Фрумин Г. Т., Михалап С. Г. Оценка динамики разнообразия рыбного населения Псковского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 91–100. doi: 10.17076/lim2058

G. T. Frumin^{1*}, S. G. Mikhlap². ASSESSMENT OF CHANGES IN THE DIVERSITY OF THE FISH POPULATION OF LAKE PSKOV

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Moika River Emb., 191186 St. Petersburg, Russia), gfrumin@mail.ru

² Pskov Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, PskovNIRO (13 Maksima Gorkogo St., 180007 Pskov, Russia)

The article addresses the topical problem of the loss of biological diversity and approaches its assessment through the case of the fish population of Lake Pskov. The input for the analysis of changes in the structure of the fish component of the lake community was fishery statistics for the period 1960–2023. For mathematical and statistical analysis, the primary dataset on industrial fish catches was divided into five-year periods. Despite the selectivity of fisheries, the structure of catches in the long-term observation series quite adequately reflects the dynamics of the fish population and changes in its species diversity, represented by the composition of catches and the biomass ratios of different fish species. However, the reliability of the assessments of the diversity decline trend by different biodiversity indices is equivocal. Therefore, the aim of this work was to compare how meaningful the different biodiversity indices are in assessing the species diversity dynamics in the fish population of Lake Pskov. The following six indices were used: Shannon index (H), Pielou index (E), Sheldon index (SH), Zhivotovsky index (μ), Simpson's dominance index (C), Simpson's diversity index (D). The matrix of paired correlations of the biodiversity indices used to assess changes in the diversity of the species structure of the Lake Pskov fish population is presented. Simpson's dominance and diversity indices (C and D) proved to be the most meaningful. From 1960 to 2023, the Simpson's diversity index (D) increased from $D = 3.70$ to 5.88 , showing a "high" positive trend (on the Chaddock scale, correlation coefficient $r = 0.85$). In addition, application of the Simpson's diversity index revealed the effect of abiotic factors on the dynamics of the fish population diversity in Lake Pskov. For the period 2000–2023, the following mathematical models were built: Simpson's diversity index – water level, water temperature, total phosphorus concentration, biochemical oxygen demand for five days, chemical oxygen demand. An adequate relationship was found between the Simpson's diversity index (D) and total phosphorus concentrations in the lake water, which reflects the negative impact of the eutrophication process on the fish population of Lake Pskov.

Keywords: Lake Pskov; fish population; dynamics of species diversity; biodiversity indices; mathematical models; abiotic factors

For citation: Frumin G. T., Mikhlap S. G. Assessment of changes in the diversity of the fish population of Lake Pskov. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 91–100. doi: 10.17076/lim2058

Введение

Актуальность проблемы сохранения и оценки биоразнообразия рассмотрена во множестве публикаций [Мэгарран, 1992; Решетников, 2000; Бобылев и др., 2002; Протасов, 2002; Примак, 2002; Шитиков, Розенберг, 2005; Бродский, 2016; Болотова, 2017; Захаров, Трофимов, 2019; Шайхутдинова, 2019; Фрумин, 2022]. Прогрессирующее снижение биоразнообразия водных экосистем в значительной мере определяется их многоплановой эксплуатацией и тесной зависимостью от

трансформированных водосборов. Наглядным индикатором этого негативного процесса является рыбное население, которое как верхний трофический уровень интегрирует в себе происходящие перестройки на низших трофических уровнях водного сообщества.

Сдвиги в структуре рыбного населения озер происходят под влиянием изменения условий обитания и воспроизводства на фоне наблюдаемых в экосистемах процессов эвтрофирования, органического и токсического загрязнения, потепления климата, а также биоинвазий [Решетников и др., 1982; Терещенко, Стрельни-

ков, 1995; Болотова, 1997; Терещенко, 2002б; Терещенко и др., 2004]. Выявление трендов изменения структуры рыбного населения необходимо для прогноза устойчивости экосистем, зависящей от поддержания биоразнообразия, что требует адекватной оценки. В исследованиях динамики разнообразия рыбной части сообщества опробовано применение индекса биоразнообразия Шеннона для анализа многолетних рядов наблюдений рыбопромысловой статистики [Терещенко и др., 1994, 2004; Терещенко, Стрельников, 1995; Терещенко, 2002а; Болотова и др., 2016].

К настоящему времени предложено более 40 индексов, предназначенных для оценки биоразнообразия [Малько, 2020]. Отмечается, что «трудности в применении показателей разнообразия и оценке их качества заключаются в сложном и комплексном характере самой интерпретируемой величины, а также в отсутствии какой-либо объективной шкалы отсчета разнообразия, независимой от концепции, принятой исследователем на основе его субъективных (точнее, интуитивных) представлений» [Шитиков, Розенберг, 2005]. Поэтому неоднозначным вопросом остается достоверность оценки тенденции снижения разнообразия рыбной части сообщества при применении разных индексов биоразнообразия.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия для оценки динамики видового разнообразия рыбного населения Псковского озера.

Материалы и методы

Псковское озеро – крупный пресноводный водоем, который является южной составляющей Чудско-Псковского озера. Делится на три основные части: Чудское озеро с площадью акватории 2611 км², Псковское озеро – 708 км² и соединяющее их Теплое озеро – 236 км² [Кондратьев и др., 2014] (рис. 1). Площадь Псковского озера 709 км², объем воды 2,68 км³, наибольшая глубина 5,3 м, средняя глубина 3,8 м, высота над уровнем моря 30 м [Псковско-Чудское..., 2012].

Уязвимость озера к антропогенному воздействию обусловлена его мелководностью. Ухудшение условий обитания и воспроизводства рыб связано с хроническим загрязнением и эвтрофированием, что вызывает перестройку структуры рыбного населения в сторону доминирования более толерантных видов, упрощение сообщества и снижение его разнообразия. Псковское озеро относится к крупным рыбопромысловым водоемам, и селективность про-

мысла вносит свой негативный вклад в изменение видового разнообразия рыбной части сообщества [Данилов, 2023].

Использованная в расчетах информация по динамике и составу уловов основана на материалах публикаций и архивных источников из фондов Псковского отделения ГосНИОРХ (Псковский филиал ФГБНУ «ВНИРО»).

Анализировался состав рыбодобычи, в котором представлены данные по вылову восьми основных промысловых видов рыб: снеток, судак, лещ, щука, налим, окунь, плотва, ерш, а также показатели уловов рыб в категории «прочие».

Для математико-статистического анализа изменения состава уловов рыб массив первичных данных рыбопромысловой статистики с 1960 по 2023 г. был разделен на пятилетние периоды (табл. 1).

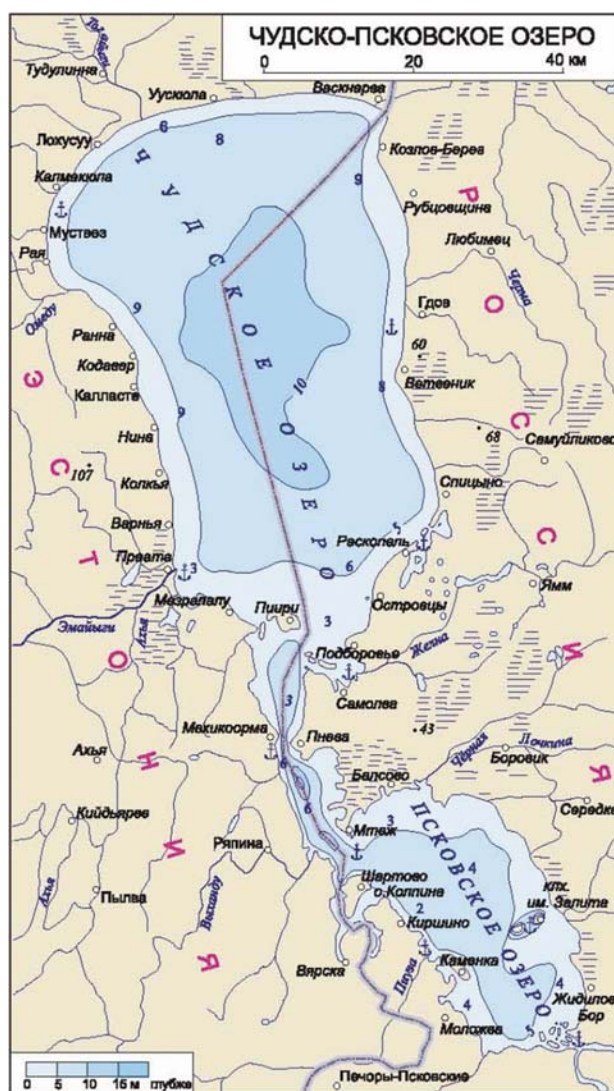


Рис. 1. Схема Чудско-Псковского озера [Кондратьев и др., 2014]

Fig. 1. Scheme of Lake Peipus [Kondrat'ev et al., 2014]

Для количественной оценки изменения разнообразия рыбного населения Псковского озера по каждому 5-летнему периоду показателей рыбодобычи использованы шесть следующих индексов биоразнообразия: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского (μ), индекс Симпсона:

индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D) [Песенко, 1982; Методы..., 2019] (табл. 2).

Расчет вышеприведенных индексов биоразнообразия (табл. 2) базируется на предварительной оценке величин доли вылова каждого вида рыб – p_i (табл. 3).

Таблица 1. Периодизация статистики рыбодобычи в Псковском озере

Table 1. Periodization of fishing statistics in Lake Pskov

Период Period	Годы Years	Период Period	Годы Years	Период Period	Годы Years
1	1960–1964	6	1985–1989	11	2010–2014
2	1965–1969	7	1990–1994	12	2015–2019
3	1970–1974	8	1995–1999	13	2020–2023
4	1975–1979	9	2000–2004	-	-
5	1980–1984	10	2005–2009	-	-

Таблица 2. Индексы биоразнообразия, использованные для оценки разнообразия рыбного населения Псковского озера

Table 2. Biodiversity indices used to assess the diversity of fish population in Lake Pskov

Индекс Index	Формула Formula
Шеннона (H) Shannon (H)	$H = -\sum p_i \log_2 p_i$, p_i – доля вида/share of species
Шелдона (SH) Sheldon (SH)	$SH = \exp(H)$
Животовского (μ) Zhivotovsky (μ)	$\mu = [\sum \sqrt{p_i}]^2$
Пиелу (E) Pielou (E)	$E = H / \log_2 S$, S – число видов/number of species
Симпсона (доминирования) (C) Simpson (dominance) (C)	$C = \sum p_i^2$
Симпсона (разнообразия) (D) Simpson (diversity) (D)	$D = 1/C$

Таблица 3. Соотношение биомассы разных видов рыб в уловах Псковского озера за 5-летние периоды с 1960 по 2023 г.

Table 3. Ratio of biomass of different fish species in catches of Lake Pskov for 5-year periods from 1960 to 2023

Период Period	Снеток Smelt	Судак Zander	Лещ Bream	Щука Pike	Налим Burbot	Окунь Perch	Плотва Roach	Ерш Ruff	Прочие Other
1	0,2821	0,0034	0,0365	0,0491	0,0224	0,0827	0,1036	0,4158	0,0045
2	0,5241	0,0015	0,0171	0,0279	0,0167	0,0679	0,0794	0,2604	0,0050
3	0,1580	0,0029	0,0079	0,0314	0,0123	0,1624	0,1285	0,4965	0,0001
4	0,2119	0,0409	0,0225	0,0361	0,0161	0,0902	0,1343	0,4846	0,0000
5	0,4662	0,0090	0,0419	0,0523	0,0180	0,0970	0,0728	0,2427	0,0000
6	0,1895	0,0497	0,0634	0,0634	0,0125	0,0615	0,0783	0,4805	0,0011
7	0,1517	0,2183	0,1140	0,0788	0,0151	0,0384	0,1490	0,2325	0,0021
8	0,0144	0,1753	0,2113	0,0700	0,0047	0,0602	0,3135	0,1427	0,0079
9	0,0010	0,1036	0,2325	0,0624	0,0020	0,0494	0,2552	0,2700	0,0239
10	0,0142	0,1100	0,2129	0,0455	0,0049	0,0438	0,2824	0,2555	0,0307
11	0,0008	0,0993	0,2676	0,0700	0,0075	0,0877	0,2116	0,2162	0,0393
12	0,0029	0,1615	0,2399	0,0645	0,0111	0,1530	0,2382	0,1265	0,0176
13	0,0000	0,2100	0,1594	0,1226	0,0016	0,2011	0,1918	0,1061	0,0076

Примечание. Цифрами с 1 по 13 обозначены 5-летние периоды в статистике рыбодобычи (табл. 1).

Note. Numbers 1 to 13 indicate 5-year periods in fishing statistics (Table 1).

Результаты и обсуждение

Для сравнительного анализа динамики видового разнообразия рыбного населения Псковского озера были проведены расчеты с использованием шести индексов, применяемых в оценке биоразнообразия сообществ экосистем (табл. 4).

Для выбора наиболее информативного индекса биоразнообразия, отражающего тренд изменения видового разнообразия рыбного населения Псковского озера, были построены регрессионные уравнения между индексами и периодами рыбодобычи, а также определены их статистические характеристики (табл. 5).

Следует подчеркнуть, что наиболее пригодное статистически значимое уравнение должно иметь наибольшее значение F , наибольший коэффициент корреляции r и наименьшую стандартную ошибку σ . Статистически значимое уравнение может быть использовано для прогнозирования лишь в том случае, если величина его F -критерия будет не менее чем в 4 раза превосходить табличное значение для уровня значимости 95 % [Дрейпер, Смит, 1986].

Сформулированным условиям соответствуют индексы Симпсона – доминирования и разнообразия (C и D). Диапазон индекса C изменяется от 0 до 1. Чем ближе значение C к 1, тем ниже разнообразие. Чем ближе значение C к 0,

Таблица 4. Показатели изменения разнообразия рыбного населения Псковского озера, рассчитанные по разным индексам биоразнообразия

Table 4. Indicators of change in the diversity of the fish population of Lake Pskov, calculated using different biodiversity indices

Годы Years	Индексы разнообразия Diversity indices					
	H	E	C	D	μ	SH
1960–1964	2,25	0,71	0,27	3,70	7,82	9,49
1965–1969	1,94	0,61	0,35	2,86	5,35	6,96
1970–1974	2,04	0,64	0,32	3,13	5,31	7,69
1975–1979	2,11	0,67	0,31	3,23	6,21	8,25
1980–1984	2,19	0,69	0,30	3,33	5,85	8,94
1985–1989	2,31	0,73	0,29	3,45	6,39	10,07
1990–1994	2,73	0,86	0,17	7,33	7,33	15,33
1995–1999	2,53	0,80	0,20	5,00	6,78	12,55
2000–2004	2,02	0,64	0,21	4,76	6,41	7,54
2005–2009	2,52	0,80	0,21	4,76	6,85	12,43
2010–2014	2,61	0,82	0,19	5,26	6,92	13,60
2015–2019	2,64	0,83	0,18	5,56	7,14	14,01
2020–2023	2,60	0,87	0,17	5,88	6,49	13,46

Таблица 5. Регрессионные уравнения и статистические характеристики индексов биоразнообразия, отражающие изменения разнообразия рыбного населения Псковского озера

Table 5. Regression equations and statistical characteristics of biodiversity indices reflecting changes in the diversity of the fish population of Lake Pskov

Регрессионные уравнения Regression equations	Статистические показатели Statistical characteristics				
	n	σ	r	F_p	F_p/F_T
$H = 2,00 + 0,049 \cdot \text{период/period}$	13	0,20	0,71	11,0	2,3
$E = 0,62 + 0,017 \cdot \text{период/period}$	13	0,06	0,74	13,6	2,9
$C = 0,34 - 0,014 \cdot \text{период/period}$	13	0,04	0,85	27,7	5,8
$D = 2,67 + 0,24 \cdot \text{период/period}$	13	0,62	0,85	27,5	5,8
$\mu = 5,41 + 0,13 \cdot \text{период/period}$	12	0,46	0,75	9,3	1,9
$SH = 7,14 + 0,52 \cdot \text{период/period}$	13	2,11	0,71	11,1	2,3

Примечание. n – число наблюдений, r – коэффициент корреляции, σ – стандартная ошибка, F_p – расчетное значение критерия Фишера, F_T – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 95 %.

Note. n – number of observations, r – correlation coefficient, σ – standard error, F_p – calculated value of Fisher's test, F_T – tabulated value of Fisher's test at a significance level of 95 %.

тем больше разнообразие среды обитания. Соответственно, чем больше величина D, тем больше биоразнообразие.

Мера доминирования Симпсона позволяет оценить, насколько равномерно распределены доли отдельных видов в сообществе. Высокие значения параметра указывают на дисбаланс в пользу численности небольшого количества видов. Мера доминирования принимает большие значения в экосистемах с ярко выраженными доминантами (то есть при наличии видов с большим количеством особей).

Рассчитанные для многолетнего периода (1960–1923 гг.) значения индексов Симпсона (D) отражают тренд увеличения доминирования по доле разных видов рыб в общей биомассе и отклонение от устойчивого состояния структуры рыбного населения Псковского озера (рис. 2).

Парные корреляции индексов биоразнообразия рыбного населения в Псковском озере представлены в табл. 6.

Согласно шкале Чеддока соотношение между индексом Шеннона (H) и индексом Пиелу (E) и между индексом Шеннона (H) и индексом Шелдона (SH) характеризуется как «весьма высокое», а между другими индексами – как «высокое» [Макарова, Трофимец, 2002]. Оценка парной корреляции между индексами разнообразия позволяет выбрать наиболее репрезентативные из них.

Информативность индекса биоразнообразия Симпсона связана с возможностью оценки зависимости разнообразия рыбного населения от абиотических факторов.

Выявлены количественные соотношения между индексом биоразнообразия Симпсона

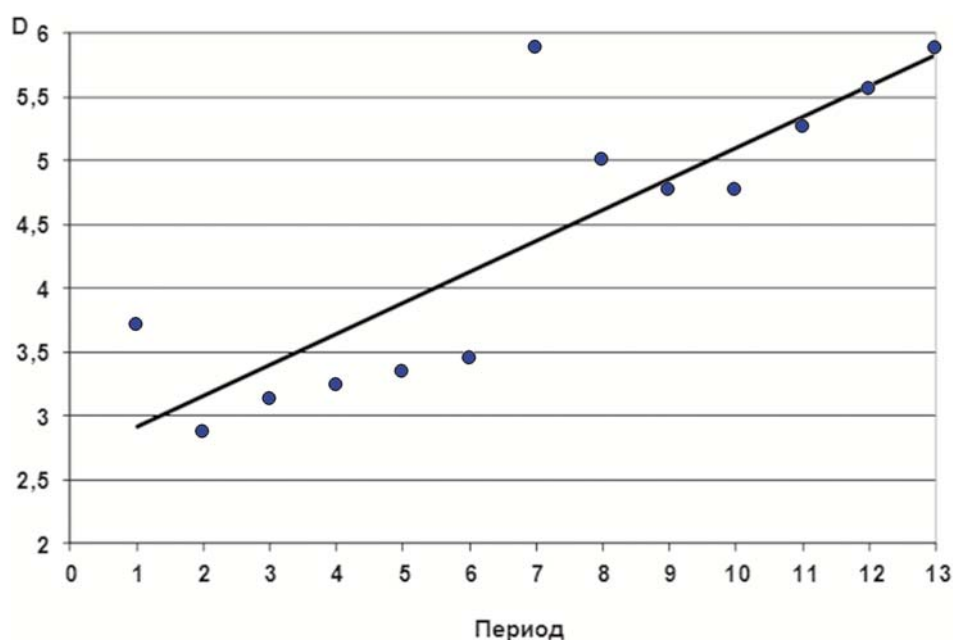


Рис. 2. Динамика индекса биоразнообразия Симпсона (D) рыбного населения Псковского озера

Fig. 2. Dynamics of the Simpson (D) biodiversity index of the fish population of Lake Pskov

Таблица 6. Матрица парных корреляций индексов биоразнообразия промысловых рыб в Псковском озере
Table 6. Matrix of paired correlations of biodiversity indices of commercial fish in Lake Pskov

Индекс Index	H	E	C	D	μ	SH
H	1	0,99	0,85	0,86	0,87	0,99
E	0,99	1	0,86	0,87	0,84	0,98
C	0,85	0,86	1	0,98	0,88	0,85
D	0,86	0,87	0,98	1	0,85	0,88
μ	0,87	0,84	0,88	0,85	1	0,87
SH	0,99	0,98	0,85	0,88	0,87	1

(D) и гидрофизическими (уровень озера, среднегодовая температура воды озера) и гидрохимическими (БПК₅, ХПК, содержание фосфора валового) факторами обитания рыб в Псковском озере (табл. 7).

При сопоставлении индекса Симпсона (D), отражающего биоразнообразие рыбного населения Псковского озера, и среднегодовых концентраций фосфора валового (P_{ВАЛ}), характеризующих уровень трофического статуса озера (рис. 3), установлена отрицательная корреляция с высокой теснотой связи ($r = 0,857 > 0,7$). Это свидетельствует об обратной зависимости между показателями трофического статуса и биоразнообразия.

Линия регрессии, приведенная на рис. 3, описывается следующей формулой:

$$D = 10,26 - 0,057P_{\text{ВАЛ}}$$

$$n = 5; r = 0,925; r^2 = 0,857; s = 0,216;$$

$$Fp = 17,9; FP/FT = 2,3.$$

Известно, что изменения в рыбном населении водоемов под влиянием эвтрофирования проявляются в следующих процессах. Происходит снижение численности и затем исчезновение наиболее требовательных к качеству условий обитания видов рыб. Отмечается изменение рыбопродуктивности водоема или отдельных его зон, что определяет его переход по рыбохозяйственному значению в другую категорию.

Таблица 7. Динамика гидрофизических и гидрохимических характеристик Псковского озера в 2000–2023 гг.
Table 7. Dynamics of the hydrophysical and hydrochemical characteristics of Lake Pskov

Годы Years	Уровень, см Level, cm	Температура воды, °C Water temperature, °C	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³ BOD ₅ , mgO ₂ /dm ³	ХПК, мгО/дм ³ COD, mgO/ dm ³	Фосфор валовый, P _{ВАЛ} мкг/дм ³ Total phosphorus, P _{tot} µg/dm ³
2000–2004	181	12,9	4,3	47,8	98,0
2005–2009	191	11,4	2,0	43,5	92,4
2010–2014	201	12,8	2,3	39,5	84,0
2015–2019	181	11,5	2,8	44,7	85,8
2020–2023	182	12,1	2,4	49,0	77,3

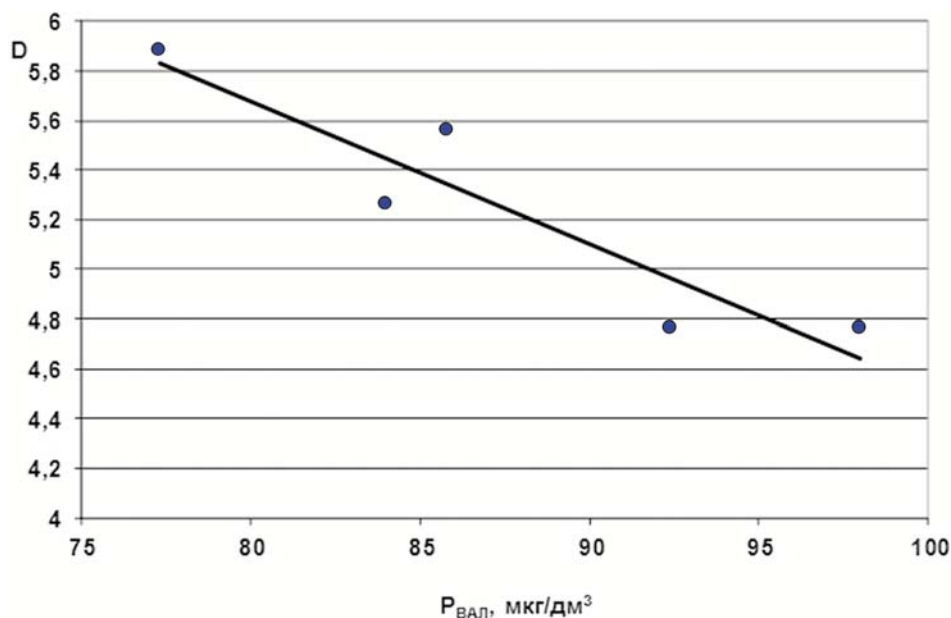


Рис. 3. Зависимость индекса биоразнообразия Симпсона (D), отражающего разнообразие рыбного населения, от концентраций фосфора валового в Псковском озере

Fig. 3. Dependence of the Simpson biodiversity index (D), reflecting the diversity of fish population, on the concentrations of total phosphorus in Lake Pskov

Заключение

Впервые для Псковского озера проведена оценка динамики разнообразия рыбного населения по многолетним рядам рыбопромысловой статистики более чем за 60-летний период. Для количественной оценки биоразнообразия использованы шесть следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского (μ), индекс Симпсона – индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D). Установлено, что наиболее информативными индексами для оценки биоразнообразия в Псковском озере являются индексы Симпсона – доминирования и разнообразия (C и D). Установлено статистически значимое соотношение между индексом биоразнообразия Симпсона (D) и среднегодовыми концентрациями фосфора валового в воде озера, характеризующими его трофический статус.

Литература

- Бобылев С. Н., Медведева О. Е., Соловьева С. Н. Экономика сохранения биоразнообразия: Справочник / Проект ГЭФ «Сохранение биоразнообразия Российской Федерации»; Институт экономики природопользования. М., 2002. 604 с.
- Болотова Н. Л. Проблемы сохранения исчезающих популяций рыб в водоемах Вологодской области // Мониторинг биоразнообразия. М.: Наука, 1997. С. 36–45.
- Болотова Н. Л. Биологическое разнообразие и проблемы его сохранения // Наука – школе: Сб. науч. статей. Вып. VI. СПб.: Арт-Экспресс, 2017. С. 119–174.
- Болотова Н. Л., Степанов М. В., Фрумин Г. Т., Болотов О. В. Динамика разнообразия рыбного населения крупных озер Вологодской области // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Мат-лы V Междунар. науч. конф. (Минск – Нарочь, 12–17 сентября 2016 года) / Белорусский гос. ун-т. Минск-Нарочь, 2016. С. 283–284.
- Бродский А. К. Биоразнообразие: структура, проблемы и перспективы сохранения // Аспекты биоразнообразия: Сб. трудов Зоологического музея МГУ им. М. В. Ломоносова. Т. 54(1). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. С. 380–396.
- Городничев Р. М. и др. Методы экологических исследований. Основы статистической обработки данных: учебно-методическое пособие / Мин-во науки и высшего образования РФ, СВФУ имени М. К. Аммосова, Институт естественных наук, Эколого-географическое отделение. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2019. 93 с.
- Данилов М. Б. Динамика популяций основных промысловых рыб Псковско-Чудского озера: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2023. 146 с.
- Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
- Захаров В. М., Трофимов И. Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2019. 160 с.
- Кондратьев С. А., Мельник М. М., Шмакова М. В., Уличев В. И. Диффузная биогенная нагрузка на Чудско-Псковское озеро с российской водосборной территории в современных условиях // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 3(32). С. 163–169.
- Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
- Малько С. В. Биоразнообразие. Конспект лекций / Керченский гос. морской технологический ун-т. Керчь, 2020. 41 с.
- Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 181 с.
- Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
- Примаков Р. Основы сохранения биоразнообразия / Пер. с англ. О. С. Якименко, О. А. Зиновьевой. М.: Изд-во НУМЦ, 2002. 256 с.
- Протасов А. А. Биоразнообразие и его оценка. Концептуальная диверсикология. Киев, 2002. 105 с.
- Псковско-Чудское озеро / Науч. ред. Т. Тимм, А. Паукас, Ю. Хаберман, А. Яани. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 495 с.
- Решетников Ю. С., Попова О. А., Стерлигова О. П. и др. Изменение структуры рыбного населения эвтрофируемого водоема / Отв. ред. М. И. Шатуновский. М.: Наука, 1982. 248 с.
- Решетников Ю. С. Состояние биологического разнообразия и функционирование водных экосистем // Изучение и охрана разнообразия фауны, флоры и основных экосистем Евразии. М.: ИПЭЭ РАН, 2000. С. 264–270.
- Терещенко В. Г. Индексы для оценки биологического разнообразия сообщества и методы анализа его динамики // Динамика разнообразия гидробионтов во внутренних водоемах России / Под ред. В. Г. Папченкова; Ин-т биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2002а. С. 143–153.
- Терещенко В. Г. Динамика биологического разнообразия рыбного населения озер при различных антропогенных воздействиях // Динамика разнообразия гидробионтов во внутренних водоемах России / Под ред. В. Г. Папченкова; Ин-т биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2002б. С. 154–173.
- Терещенко В. Г., Стрельников А. С. Анализ перестройки в рыбной части озера Балхаш в результате интродукции новых видов рыб // Вопросы ихтиологии. 1995. Т. 35, вып. 1. С. 71–77.
- Терещенко В. Г., Терещенко Л. И., Сметанин М. М. Оценка различных индексов для выражения биологического разнообразия сообщества // Биоразнообразие: Степень таксономической изученности. М., 1994. С. 86–97.
- Терещенко В. Г., Стерлигова О. П., Павлов В. Т., Ильмаст Н. В. Многолетняя динамика структурных и системных характеристик рыбного населения эвтро-

фируемого Сямозера // Биология внутренних вод. 2004. № 3. С. 93–102.

Фрумин Г. Т. Динамика экологического состояния Ладожского озера // Экологическая химия. 2022. Т. 31(5). С. 253–257.

Шайхутдинова А. А. Методы оценки биоразнообразия: методические указания. Оренбург: ОГУ, 2019. 37 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения // Количественные методы экологии и гидробиологии. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 91–129.

References

Bobylev S. N., Medvedeva O. E., Solov'eva S. N. Economics of biodiversity conservation: a handbook. GEF project *Conservation of Biodiversity of the Russian Federation*; Institute of Environmental Economics. Moscow; 2002. 604 p. (In Russ.)

Bolotova N. L. Problems of conservation of endangered fish populations in water bodies of the Vologda Region. *Monitoring bioraznoobraziya = Monitoring of biodiversity*. Moscow: Nauka; 1997. P. 36–45. (In Russ.)

Bolotova N. L. Biological diversity and problems of its conservation. *Nauka – shkole: Sb. nauch. statei = Science to School. Proceedings*. Iss. VI. St. Petersburg: Art-Express; 2017. P. 119–174. (In Russ.)

Bolotova N. L., Stepanov M. V., Frumin G. T., Bolotov O. V. Dynamics of diversity of fish population of large lakes of the Vologda Region. *Ozernye ekosistemy: biologicheskie protsessy, antropogennaya transformatsiya, kachestvo vody: Mat-ly V Mezhdunar. nauch. konf. (Minsk – Naroch', 12–17 sentyabrya 2016 goda) = Lake ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, and water quality: Proceedings of the Vint. scientific conference (Minsk - Naroch, Sept. 12-17, 2016)*. Minsk-Naroch; 2016. P. 283–284. (In Russ.)

Brodskii A. K. Biodiversity: structure, problems and conservation prospects. *Aspekty bioraznoobraziya: Sb. trudov Zoologicheskogo muzeya MGU im. M. V. Lomonosova = Aspects of biodiversity. Proceed. of the Zoological Museum of Moscow State University*. Vol. 54(1). Moscow: KMK; 2016. P. 380–396. (In Russ.)

Danilov M. B. Population dynamics of the main commercial fish of Lake Peipsi-Pskov: PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 2023. 146 p. (In Russ.)

Draper N., Smith G. Applied regression analysis. Moscow: Finansy i statistika; 1986. 366 p. (In Russ.)

Frumin G. T. Dynamics of the ecological state of Lake Ladoga. *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry*. 2022;31(5):253–257. (In Russ.)

Gorodnichev R. M. et al. Methods of environmental research. Fundamentals of statistical data processing: a study guide. Yakutsk: Izd. dom SVFU; 2019. 93 p. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Mel'nik M. M., Shmakova M. V., Ulichev V. I. Diffuse biogenic load on Lake Peipus-Pskov from the Russian catchment area under modern conditions. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie = Society. Environment. Development*. 2014;3(32):163–169. (In Russ.)

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistics in Excel. Moscow: Finansy i statistika; 2002. 368 p. (In Russ.)

Mal'ko S. V. Biodiversity: lecture notes. Kerch State Maritime Technological University. Kerch; 2020. 41 p. (In Russ.)

Magarran E. Ecological diversity and its measurement. Moscow: Mir; 1992. 181 p. (In Russ.)

Pesenko Yu. A. Principles and methods of quantitative analysis in faunistic studies. Moscow: Nauka; 1982. 288 p. (In Russ.)

Primack R. A primer of conservation biology. Transl. from English by O. S. Yakimenko, O. A. Zinovieva. Moscow: NUMTs; 2002. 256 p. (In Russ.)

Protasov A. A. Biodiversity and its assessment. Conceptual diversification. Kiev; 2002. 105 p. (In Russ.)

Reshetnikov Yu. S., Popova O. A., Sterligova O. P. et al. Changes in the structure of the fish population of an eutrophicated reservoir. Moscow: Nauka; 1982. 248 p. (In Russ.)

Reshetnikov Yu. S. State of biological diversity and functioning of aquatic ecosystems. *Izuchenie i okhrana raznoobraziya fauny, flory i osnovnykh ekosistem Evrazii = Study and protection of the diversity of fauna, flora and main ecosystems of Eurasia*. Moscow: IPEE RAN; 2000. P. 264–270.

Shaikhutdinova A. A. Methods of biodiversity assessment: guidelines. Orenburg: OSU; 2019. 37 p. (In Russ.)

Shitikov V. K., Rosenberg G. S. Biodiversity assessment: an attempt at formal generalization. *Kolichestvennye metody ekologii i gidrobiologii = Quantitative methods of ecology and hydrobiology*. Tolyatti: Samara SC RAS; 2005. P. 91–129. (In Russ.)

Tereshchenko V. G. Indices for assessing the biological diversity of a community and methods for analyzing its dynamics. *Dinamika raznoobraziya gidrobiontov vo vnutrennikh vodoemakh Rossii = Dynamics of the diversity of hydrobionts in inland waters of Russia*. Yaroslavl: YaGTU; 2002a. P. 143–153 (In Russ.)

Tereshchenko V. G. Dynamics of biological diversity of fish population of lakes under various anthropogenic impacts. *Dinamika raznoobraziya gidrobiontov vo vnutrennikh vodoemakh Rossii = Dynamics of the diversity of hydrobionts in inland waters of Russia*. Yaroslavl: YaGTU; 2002b. P. 154–173. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Strel'nikov A. S. Analysis of restructuring in the fish part of Lake Balkhash as a result of the introduction of new fish species. *Voprosy ikhtologii = Journal of Ichthyology*. 1995;35(1):71–77. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Tereshchenko L. I., Smetanin M. M. Evaluation of various indices for expressing the biological diversity of a community. *Bioraznoobrazie: Stepen' taksonomicheskoi izuchennosti = Biodiversity: Available taxonomic data*. Moscow; 1994. P. 86–97. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Sterligova O. P., Pavlov V. T., Ilmast N. V. Long-term dynamics of structural and systemic characteristics of the fish population of eutrophicated Lake Syamozero. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2004;3:93–102. (In Russ.)

Timm T., Raukas A., Haberman J., Jaani A. (eds.). Lake Pskov-Chudskoe. Tartu: Eesti Loodusfoto; 2012. 495 p. (In Russ.)

Zakharov V. M., Trofimov I. E. Assessment of the state of biodiversity: a study of development stability. Moscow: KMK; 2019. 160 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 29.01.2025; принята к публикации / accepted: 21.02.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

д-р хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник
научно-исследовательской лаборатории
факультета географии

e-mail: gfrumin@mail.ru

Михалап Сергей Геннадиевич

руководитель филиала

e-mail: pskovniro@vniro.ru

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher

Mikhalap, Sergey

Head of VNIRO Pskov Branch

УДК 582.32 + 556.114

ПОДХОД К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ВКЛАДА МХА (*WARNSTORFIA FLUITANS*) В БАЛАНС УГЛЕРОДА В ДИСТРОФНОМ ВОДОЕМЕ

Е. В. Теканова*, Р. Э. Здоровеннов, М. В. Зобкова, М. Б. Зобков,
А. В. Толстиков, Д. С. Коновалов

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

В рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН в 2024 г. начал лимнологические исследования на малом бессточном дистрофном водоеме (заповедник «Кивач», Карелия) для целей разработки системы мониторинга запасов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах (водоемах, водотоках) бореальной зоны Европейского Севера России. В таких озерах дно покрыто зелеными мхами, которые могут вносить значительный вклад в круговорот углерода. С этой целью проведены исследования фотосинтеза и дыхания доминирующего вида мха *Warnstorfia fluitans* (Hedw.) Loeske из модельного водоема. Методический подход был основан на оценке интенсивности фотосинтеза и дыхания мха кислородным методом Винклера по принципу светлых (фотосинтез) и темных (дыхание) склянок в лабораторном эксперименте. Оценивалось изменение концентрации кислорода в склянках с зелеными побегами *W. fluitans* по отношению к его исходной концентрации после суточной инкубации. Склянки инкубировались в климатостате при установленных температуре, освещенности и длине светового дня, которые соответствовали условиям на поверхности мохового мата в исследуемом водоеме. Рассчитаны величины удельного фотосинтеза (0,052), дыхания (0,02) и эффективность роста (0,032) фотосинтетически активного (зеленого) мха. На основе этих коэффициентов и сырого веса фотосинтетически активного мха с 1 м² верхнего слоя мохового мата были рассчитаны летние суточные величины фотосинтеза (211 мг С), чистой продукции (81 мг С) и дыхания (130 мг С) *W. fluitans*. Ранее кислородный метод Винклера использовался для определения фотосинтеза и дыхания водных бриофитов *in situ*, что представляет собой весьма сложный и трудоемкий процесс. Результаты настоящего исследования вполне сопоставимы с литературными сведениями о чистой продукции и дыхании мхов в высокоширотных водоемах, полученными другими способами, и показали возможность таких измерений *in vitro*.

Ключевые слова: водные бриофиты; дистрофный водоем; фотосинтез; дыхание; эффективность роста; лабораторный эксперимент; кислородный метод Винклера

Для цитирования: Теканова Е. В., Здоровеннов Р. Э., Зобкова М. В., Зобков М. Б., Толстиков А. В., Коновалов Д. С. Подход к количественной оценке вклада мха (*Warnstorfia fluitans*) в баланс углерода в дистрофном водоеме // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 101–110. doi: 10.17076/lim2000

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН) в рамках ВИП ГЗ «Российская система климатического мониторинга».

E. V. Tekanova*, R. E. Zdorovenov, M. V. Zobkova, M. B. Zobkov, A. V. Tolstikov, D. S. Konovalov. AN APPROACH TO QUANTIFYING THE CONTRIBUTION OF AQUATIC MOSSES (*WARNSTORFIA FLUITANS*) TO THE CARBON BALANCE IN WATER BODIES

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

In 2024, the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences began limnological studies on a small drainless dystrophic water body (in the Kivach Nature Reserve, Karelia) within the framework of the Key Innovative Project of National Importance “Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances” to develop a system for monitoring carbon pools and greenhouse gas fluxes in boreal aquatic ecosystems (water bodies, watercourses) of North European Russia. In such lakes, the bottom is covered with Bryidae mosses, which can make a significant contribution to the carbon cycle. Therefore, studies of photosynthesis and respiration of the dominant moss species *Warnstorfia fluitans* (Hedw.) Loeske from a model water body were carried out. The methodological approach was based on estimating the rates of photosynthesis and respiration of the moss using the Winkler method relying on the principle of light (photosynthesis) and dark (respiration) flasks in a laboratory experiment. The change in the oxygen concentration in flasks with green shoots of *W. fluitans* versus the initial concentration was estimated after 24-hour incubation. The flasks were incubated in a climate chamber at the temperature, illumination, and daylight hours that corresponded to the conditions on the moss mat surface in the studied water body. The specific rate of photosynthesis (0.052), specific rate of respiration (0.02) and growth efficiency (0.032) of photosynthetically active (green) moss were calculated. Based on these indices and the wet weight of photosynthetically active moss from 1 m² area from the upper layer of the moss mat, we derived the summer daily values of gross photosynthesis (211 mg C), net production (81 mg C) and respiration (130 mg C) of *W. fluitans*. Previously, the Winkler method was used to determine the photosynthesis and respiration of aquatic bryophytes *in situ*, which is a very complex and laborious process. The results of the present study are in good agreement with published data on the net production and respiration of mosses in high-latitude lakes obtained by other methods, demonstrating the feasibility of running such measurements *in vitro*.

Keywords: dystrophic water body; aquatic bryophytes; photosynthesis; respiration; growth efficiency; laboratory experiment; Winkler oxygen method

For citation: Tekanova E. V., Zdorovenov R. E., Zobkova M. V., Zobkov M. B., Tolstikov A. V., Konovalov D. S. An approach to quantifying the contribution of aquatic mosses (*Warnstorfia fluitans*) to the carbon balance in water bodies. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 101–110. doi: 10.17076/lim2000

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Karelian Research Center RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS) within the Key Innovative Project of National Importance «Russian Climate Monitoring System».

Введение

В рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» («Ритм углерода») в Институте водных проблем Севера Карельского научного центра РАН проводятся исследования

для разработки системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах Европейского Севера России. В 2024 г. одной из задач работы являлась оценка поглощения и выделения углекислого газа в модельном водоеме Чудесная ламба, расположенном на тестовом полигоне в заповеднике «Кивач» (Карелия).

Известно, что важный вклад в баланс углерода в водной экосистеме вносит биота. Если автотрофная продукция (фотосинтез) превышает экосистемное дыхание, углекислый газ поглощается из воды, в обратном случае происходит пополнение водоема углекислым газом и возможна его эмиссия [del Giorgio et al., 1997; Dodds, Cole, 2007]. В озерах Арктики, Антарктики, высокогорных районов, болот, заболоченных лесов доминирующими продуцентами органического вещества часто являются бриофиты, так как они способны благополучно развиваться в условиях нехватки биогенных веществ, низкой освещенности, температуры, pH [Bryophyte..., 2011].

Методы оценки вклада мхов в биопродуктивность водоемов хорошо разработаны (метод пробных площадок, метод реконструкции). В их основе лежат измерения прироста мха, т. е. чистой продукции, с площади дна за определенный период. В то же время исследований дыхания подводных мхов, как показал анализ литературы, крайне мало. В нашем распоряжении оказались лишь две публикации по оценке фотосинтеза и дыхания мхов *in situ* в высокоширотных водоемах, выполненной кислородным методом Винклера в 1970-е годы [Welch, Kalff, 1974; Priddle, 1980]. Такие измерения представляют собой сложный и трудоемкий процесс. Возможно измерение динамики кислорода и углекислого газа непосредственно в открытой воде озера при условии точного расчета газообмена между водой и атмосферой. Однако такой способ может быть реализован в том случае, если бриофиты являются основным продуцентом, создавая более 90 % первичной продукции [Pedersen et al., 2013]. Современные экспериментальные методы измерения фотосинтеза и дыхания погруженных растений основаны на электрохимическом измерении продукции и убыли кислорода в специально сконструированных установках, требующих отдельного помещения [Pedersen et al., 2013].

Ламба Чудесная в заповеднике «Кивач» относится к категории дистрофных кислых водоемов. Такие озера характеризуются слабым развитием флоры и фауны, донная растительность представлена мхами [Комов, Лазарева, 1994], что определяет необходимость учета этого компонента биоты в продукционно-деструкционных процессах экосистемы. Целью настоящей работы была оценка фотосинтеза и дыхания доминирующего вида мха *Warnstrofia fluitans* (Hedw.) Loeske в ламбе Чудесная *in vitro* кислородным методом Винклера.

Материалы и методы

Бессточная ламба Чудесная расположена на верховом болоте. Ее площадь составляет 0,007 км², глубина 2–4 м. Воды ламбы ультрапресные со средней минерализацией 1,4 мг/л, относятся к гуматному типу, группе кальция. Согласно геохимической классификации поверхностных вод гумидной зоны [Лозовик, 2013], воды соответствуют бесщелочностному кислому классу (pH 4.7, HCO₃⁻ отсутствуют). Водоем мезогумусный (цветность 56 град, ПО 11,3 мг О/л, ХПК 24 мг О/л), дистрофный ввиду кислой реакции среды (Р_{общ} 16 мкг/л, Р_{мин} 1 мкг/л).

Летом кислорода в воде (до поверхности мха) достаточно для развития аэробных процессов – до 10,5 мг/л (76–86 % насыщения), концентрация углекислого газа высокая – 4–11 мг/л. В период ледостава содержание кислорода в воде критически низкое – до 0,3 мг О₂/л (2–5 % насыщения), а концентрация углекислого газа превышает таковую летом более чем в 2 раза – 12,7–19,5 мг/л.

Дно водоема покрыто мхом. Около 80 % площади покрытия представлено варнстронгией плавающей (*W. fluitans*). Вблизи берега (около 15 % площади) развивается преимущественно сфагнум остроконечный (*Sphagnum cuspidatum* Ehrh. ex Hoffm) (видовое определение мхов выполнено М. А. Бойчук). Эти два вида мхов – обычные обитатели кислых сред с низким содержанием биогенных веществ и часто встречаются вместе.

Высоту мохового мата определяли косвенно по изменению мутности воды, измеренной мультипараметрическим зондом CTD90M, фотосинтетически активную радиацию – мультипараметрическим зондом RBR Concerto, прозрачность воды – диском Секки. Физико-химические показатели воды измеряли в соответствии с методическими указаниями [Аналитические..., 2017].

Пробы мха *W. fluitans* для лабораторного эксперимента были собраны в июле 2024 года. В эксперименте измеряли фотосинтетическую (Р/В-коэффициент) и дыхательную (R/В-коэффициент) активность и эффективность роста мха. По этим показателям и взвешенной фотосинтетически активной биомассе рассчитывали общий фотосинтез, чистый фотосинтез (прирост фитомассы) и дыхание *W. fluitans* с 1 м² площади дна.

Количественная оценка фотосинтетически активной биомассы мха *W. fluitans*

W. fluitans является растением с центральным стеблем и многочисленными облиственными веточками, верхушки которых постоянно

нарастают, а нижние части растения постепенно отмирают. Поэтому пробы мха брали только из верхнего слоя мохового мата с применением техники подводного плавания. Для этого использовали перевернутый пластиковый контейнер площадью 344 см² и высотой 25 см, который сразу под водой закрывали крышкой. На берегу слегка отжатую фитомассу из контейнера помещали в пластиковый пакет. Всего было получено пять проб, четыре из которых содержали объем одного контейнера и одна – объем двух контейнеров. В собранных пробах содержались как фотосинтетически активные (зеленые), так и отмирающие (коричневые) части побегов. Для измерения веса фотосинтетически активной сырой биомассы из проб выбирали только зеленые побеги. Побеги промывали дистиллированной водой, обсушивали на фильтровальной бумаге в течение 10 мин и взвешивали. Далее их вес с площади 344 см² пересчитывали на 1 м² верхней (25 см) части мохового покрытия. Этот слой включал фотосинтезирующую часть всего мохового мата, так как максимальная длина зеленых побегов составляла 22 см, наиболее часто встречались побеги длиной 10–15 см. Таким же способом взвешивали остальную (коричневую) сырую фитомассу *W. fluitans* в собранных пробах.

*Эксперимент по определению
Р/В-, R/B-коэффициентов
и эффективности роста W. fluitans*

За основу эксперимента взят способ измерения фотосинтеза погруженной водной растительности кислородным методом *in vitro* [Pedersen et al., 2013], адаптированный к нашим возможностям. Сущность метода заключается в оценке изменения содержания кислорода в светлых (фотосинтез) и темных (дыхание) склянках после инкубации по сравнению с его исходной концентрацией. Этот метод широко используется для измерения фотосинтеза и дыхания планктона [Кузнецов, Дубинина, 1989]. До начала эксперимента зеленые побеги *W. fluitans* в течение 4 дней сохраняли в воде из водоема в затененной стеклянной холодильной камере при температуре 13 °С в соответствии с температурой воды над поверхностью мохового мата, измеренной во время сбора проб мха. Перед проведением эксперимента побеги были тщательно промыты дистиллированной водой и обсушены в течение 10 мин на фильтровальной бумаге. Для эксперимента были взяты три разные фитомассы *W. fluitans* – 0,119, 0,564

и 0,810 г. При этом для светлых и темных склянок одного варианта подбирали максимально одинаковую фитомассу. Взвешенную фитомассу помещали в светлые и темные стеклянные склянки с притертыми крышками объемом около 300 мл. После этого склянки с побегами *W. fluitans* через сифон заполняли предварительно подготовленной водой, взятой из слоя воды над моховым матом в исследуемом водоеме. Склянки с мхом помещали на сутки в климатостат при освещенности, длине светового дня и температуре, соответствующих естественным условиям обитания *W. fluitans* в ламбе Чудесная.

Для исключения влияния фотосинтеза и дыхания планктона на результаты эксперимента воду из ламбы Чудесная предварительно подвергли ступенчатому фильтрованию. Сначала воду пропустили через двойной слой газа № 76 для удаления крупной взвеси и зоопланктона, затем – через мембранный ацетатцеллюлозный фильтр «Владипор» с диаметром пор 0,8 мкм для удаления фитопланктона и на последнем этапе – через мембранный ацетатцеллюлозный фильтр «Владипор» с диаметром пор 0,45 мкм для удаления бактериопланктона.

После суточной инкубации с помощью сифона осторожно, не допуская образования пузырьков, перелили воду из каждой экспериментальной склянки в две параллельные склянки с притертыми крышками объемом 120 мл и сразу зафиксировали кислород. Содержание кислорода в склянках определили титриметрическим методом Винклера и рассчитали суточную скорость фотосинтеза и дыхания навески мха [Кузнецов, Дубинина, 1989]. Для пересчета результатов в единицы углерода использовали коэффициент 0,3 [Бульон, 1993]. По разнице между фотосинтезом и дыханием рассчитали чистую продукцию или прирост биомассы, по соотношению фотосинтеза (чистой продукции, дыхания) и массы навесок мха – Р/В-коэффициенты, эффективность роста, R/B-коэффициенты соответственно.

Условия инкубации

Непосредственно перед экспериментом в фильтрованной воде измерили показатели pH, CO₂, HCO₃⁻, O₂ для оценки ее соответствия характеристикам кислотно-щелочного баланса и кислородных условий в озерной воде (табл. 1). Установлено, что в фильтрованной воде снизилась насыщенность кислородом, однако она была достаточной для протекания аэробных процессов.

Таблица 1. Характеристики кислотно-щелочного баланса и содержание кислорода в воде до и после фильтрации

Table 1. Characteristics of acid-base balance and oxygen content in water before and after filtration

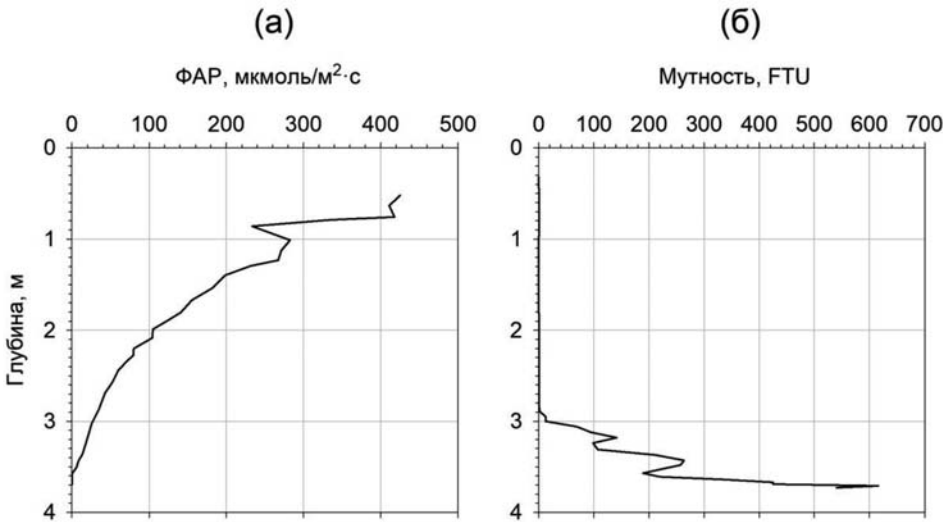
Вода Water	pH	CO ₂ , мг/л mg/L	O ₂ , % насыщ. Water saturation with O ₂ , %	HCO ₃ ⁻ , мг/л mg/L
Озерная вода Lake water	4,60	10,12	77	0
Фильтрованная вода Filtered water	4,63	10,12	61	0

Температура в камере климатостата 13,0 °С была установлена в соответствии с температурой воды в зоне произрастания мха в водоеме. Равномерное распределение температуры по камере обеспечивалось с помощью встроенного вентилятора. Освещенность составляла около 3000 лх, что соответствует фотосинтетически активной радиации над моховым матом около 40 мкмоль/м²·с. Длина светового дня была задана в соответствии с длиной светового дня в г. Петрозаводске на 08.07.24 (19 час.) за вычетом 1 часа перед рассветом и 1 часа перед закатом и составила 17 часов.

Эксперимент проведен на оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Результаты и обсуждение

Летом в период сбора проб в ламбе Чудесная отмечались благоприятные условия для вегетации мхов. Величина прозрачности воды 2,9 м достигала мохового мата. Фотосинтетически активная радиация над матом составляла около 40 мкмоль/м²·с, или около 10 % от поверхностной (рис., а). Насыщение воды кислородом над поверхностью мха составляло 77 %, pH воды – 4,6, концентрация CO₂ – более 10 мг/л (табл. 1). Следует подчеркнуть, что насыщенность воды углекислым газом весьма важна для *W. fluitans*, так как в процессе фотосинтеза она ассимилирует исключительно углекислоту [Riis et al., 2010]. Толщина мохового мата в водоеме достигала 80 см (рис., б).



Фотосинтетически активная радиация (ФАР) (а) и мутность воды (б) в ламбе Чудесная в июле 2024 года. Единица измерения мутности воды 1 FTU = 0,58 мг/л каолина

Photosynthetically active radiation (PAR) (a) and turbidity of the water (b) in Chudesnaya Lamba in July 2024. The unit of measurement of water turbidity is 1 FTU = 0.58 mg/l of kaolin

Максимальная длина зеленых побегов была 22 см, то есть фотосинтетически активный слой составлял лишь около 25 % мата.

Результаты эксперимента по измерению фотосинтеза и дыхания разных навесок фотосинтетически активной фитомассы *W. fluitans* представлены в таблице 2. Во всех вариантах эксперимента зарегистрированные величины фотосинтеза и дыхания мха закономерно возрастали по мере увеличения фитомассы. Так как условия эксперимента исключали фотосинтез и дыхание планктона, можно оценить чистую продукцию или прирост биомассы по разнице между фотосинтезом и дыханием мха (табл. 2). Следует отметить сходство доли чистого фотосинтеза в общей ассимиляции углекислого газа во всех вариантах эксперимента – 61, 63, 53 % соответственно. Остальная часть фиксированного углекислого газа расходовалась на дыхание.

При расчете Р/В-, R/В-коэффициентов и эффективности роста *W. fluitans* на основе полученных данных (табл. 2) возникли определенные трудности, связанные с перерасчетом сырой биомассы в единицы углерода. Известно, что в абсолютно сухой массе мхов содержание углерода составляет около 50 % [Pakarinen, Vitt, 1974; Бобкова, Тужилкина, 2001]. Однако сведения о соотношении сухого вещества и воды в биомассе получены при исследовании главным образом наземных мхов, в которых содержание

воды в значительной степени зависит от увлажненности местообитания и поэтому очень сильно варьирует. В публикациях чаще приводятся данные, что абсолютно сухой вес достигает 15–30 % в исходной фитомассе наземных бриофитов [Dilk, Proctor, 1979; Fowbert, 1996 и др.]. Учитывая, что погруженные мхи максимально насыщены водой, в нашей работе содержание сухого вещества было принято за 10 % сырой биомассы, а углерода, соответственно, за 5 %. Очевидно, что при продолжении исследований фотосинтеза и дыхания водного мха кислородным методом для более точных расчетов необходимо будет измерить не только его сырую фитомассу, но и абсолютно сухой вес.

Результаты эксперимента показали очень слабую физиологическую активность *W. fluitans* (табл. 3). Величины Р/В-коэффициентов были на 1–2 порядка ниже, чем у фитопланктона [Гутельмахер, 1986].

Обращает на себя внимание то, что с увеличением биомассы (второй и третий варианты эксперимента) удельный фотосинтез и эффективность роста снижаются в 2–3 раза, а удельное дыхание – на порядок (табл. 3). Можно предположить следующие объяснения такого результата, связанные с инкубацией в небольших изолированных объемах воды:

1) Поглощение большого количества кислорода. Насыщение воды кислородом при постановке эксперимента составляло 61 % (табл. 1).

Таблица 2. Суточные величины фотосинтеза и дыхания *W. fluitans* в эксперименте
Table 2. Daily values of photosynthesis and respiration of *W. fluitans* in the experiment

Вариант Variant	Фотосинтез Photosynthesis			Дыхание Respiration	
	В ¹ , мг mg	Р _{общ} ² , мкг С/л Р _{gross} ² , µg C/L	Р _{чист} ³ , мкг С/л Р _{net} ³ , µg C/L	В, мг mg	Р ⁴ , мкг С/л µg C/L
1	119	305,0	187,6	114	117,3
2	564	603,7	379,5	560	224,2
3	810	727,1	388,1	824	339,0

Примечание. ¹ Сырая биомасса навески, ² фотосинтез общий, ³ фотосинтез чистый, ⁴ дыхание.
Note. ¹ Sample wet weight, ² gross photosynthesis, ³ net photosynthesis, ⁴ respiration.

Таблица 3. Суточные Р/В-, R/В-коэффициенты и эффективность роста фотосинтетически активной *W. fluitans* в эксперименте
Table 3. Daily specific rate of photosynthesis and respiration and growth efficiency of photosynthetic active *W. fluitans* in the experiment

Вариант Variant	Р/В-коэффициент Specific rate of photosynthesis	Эффективность роста Growth efficiency	R/В-коэффициент Specific rate of respiration
1	0,052	0,032	0,02
2	0,020	0,014	0,008
2	0,020	0,010	0,008

После эксперимента в светлых склянках во всех вариантах оно возросло в результате фотосинтеза, в то время как в темных склянках, где углекислый газ поглощался в процессе дыхания, в первом варианте оно составило 60 %, во втором – 54 %, в третьем – 48 %. Таким образом, недонасыщенность воды кислородом во втором и третьем вариантах могла в определенной мере угнетать аэробные процессы.

2) *Поглощение большого количества углекислого газа.* Несмотря на то что содержание CO_2 в воде по окончании эксперимента не измеряли, для косвенной оценки его поглощения можно привести данные измерений показателей чистого фотосинтеза (табл. 2). Это условно невозвратное поглощение CO_2 на рост биомассы составляло от 188 до 388 мкг С/сут в зависимости от фитомассы. При концентрации CO_2 в воде на начало эксперимента 10,12 мг/л потребление углекислоты на чистый фотосинтез составило лишь 1,8–3,8 %, то есть не могло существенно снижать его количество в экспериментальных склянках.

3) *Самозатенение.* В первом варианте эксперимента в склянку объемом 300 мл были помещены 2 побега, во втором – 5 побегов, в третьем – 8 побегов. Самозатенение побегов во втором и третьем вариантах в результате значительного объема фитомассы в склянках можно считать вполне возможным.

Результаты эксперимента показали, что в будущем при измерениях фотосинтеза и дыхания мхов скляночным кислородным методом фитомасса для инкубации не должна превышать 120 мг при объеме склянки 300 мл или объем склянки должен быть больше во избежание значительного снижения кислорода и самозатенения побегов. Наши дальнейшие расчеты фотосинтеза и дыхания варнстрофии в ламбе Чудесная проводились с использованием результатов первого варианта эксперимента.

В таблице 4 представлены результаты взвешивания фитомассы из пяти проб площа-

дью 344 см² из верхнего (25 см) слоя мохового мата. Так как плотность покрытия дна мхом неравномерна, общая и фотосинтетически активная фитомасса в пробах существенно различались. Как видно из таблицы 4, фотосинтетически активная фитомасса составляла менее 40 % от общей.

Расчеты фотосинтетически активной фитомассы *W. fluitans* с 1 м² площади дна представлены в таблице 5. Используя экспериментально полученные для *W. fluitans* P/B- и R/B-коэффициенты, а также эффективность роста – 0,052, 0,02 и 0,032 соответственно (табл. 3), из фотосинтетически активной фитомассы разных проб одного объема (табл. 4) были рассчитаны общий фотосинтез, дыхание и чистая продукция (прирост фитомассы) *W. fluitans* на 1 м² фотосинтетически активного слоя мохового мата (табл. 5). Средняя величина (из пяти проб) общего фотосинтеза составила 211 мг С/м²·сут, дыхания – 81,2 мг С/м²·сут, прирост биомассы – 129,8 мг С/м²·сут.

В литературе практически нет сведений о дыхании водных мхов для сравнения с полученной в эксперименте величиной. В двух доступных публикациях об исследованиях водоемов Арктики и Антарктиды приводятся суточные величины дыхания мхов, схожие с полученными нами для *W. fluitans* в ламбе Чудесная, – 60 мг С/м² [Priddle, 1980] и 77 мг С/м² [Welch, Kalff, 1974]. Показатели чистого фотосинтеза (прироста биомассы) *W. fluitans* с 1 м² в ламбе Чудесная также оказались вполне сопоставимы с литературными сведениями о росте мхов в высокоширотных водоемах, полученными разными методами. Например, в финских озерах величины фотосинтеза мха *W. fluitans* в среднем составляли 330 мг С/м²·сут [Adebayo et al., 2023], в Антарктиде – 121 мг С/м²·сут [Priddle, 1980], в Арктике – 195 мг С/м²·сут [Welch, Kalff, 1974].

В то же время рассчитанная по экспериментальным данным эффективность роста

Таблица 4. Результаты оценки сырой фитомассы *W. fluitans* в пробах, г

Table 4. Results of evaluation of *W. fluitans* wet weight in samples, g

Показатель Indicator	Проба 1 Sample 1	Проба 2 Sample 2	Проба 3 ² Sample 3 ²	Проба 4 Sample 4	Проба 5 Sample 5
Фитомасса ФА ¹ Phytomass PhA ¹	4,655	4,812	2,904	0,117	2,955
Фитомасса общая Total phytomass	23,29	12,175	23,168	10,795	11,264
ФА/общ. фитомасса, % PhA/total phytomas, %	20	39	12	1	26

Примечание. ¹ Фотосинтетически активная фитомасса, ² проба 3 содержала двойной объем (два контейнера) фитомассы.

Note. ¹ Photosynthetic active phytomass, ² sample 3 contained double volume (two containers) of phytomass.

Таблица 5. Фитомасса, фотосинтез и дыхание *W. fluitans* в верхнем слое (25 см) мохового мата с 1 м² площади в ламбе Чудесная

Table 5. Phytomass, photosynthesis and respiration of *W. fluitans* in the upper layer (25 cm) of a moss mat on 1 m² of area in Chudesnaya Lamba

Показатель Indicator	Проба 1 Sample 1	Проба 2 Sample 2	Проба 3 Sample 3	Проба 4 Sample 4	Проба 5 Sample 5
Фитомасса ФА ¹ сырая, г Wet weight of phytomass PhA, g	134,995	139,548	42,108	3,393	85,695
Фитомасса общ. сырая, г Wet weight of total phytomass, g	675,55	353,075	335,936	313,053	326,6
Фитомасса ФА, г С Phytomass PhA, g C	6,75	6,97	2,11	0,17	4,28
Фитомасса общ., г С Total phytomass, g	33,78	17,65	16,80	15,65	16,33
Фотосинтез общий, мг С/сут ² Gross photosynthesis, mg C/day	351,0	362,8	109,5	8,8	222,8
Дыхание, мг С/сут ² Respiration, mg C/day	135,0	139,5	42,1	3,4	85,7
Фотосинтез чист., мг С/сут ² Net photosynthesis, mg C/day	216,0	223,3	67,4	5,4	137,1

Примечание. ¹ Фотосинтетически активная фитомасса, ² расчет производился по фотосинтетически активной фитомассе.

Note. ¹ Photosynthetic active phytomass, ² the calculation is based on photosynthetically active phytomass.

W. fluitans (0,032 сут⁻¹) в ламбе Чудесная оказалась существенно выше, чем встречается в литературных источниках для северных водоемов – 0,001–0,012 сут⁻¹ [Priddle, 1980; Ильяшук, 1999; Riis et al., 2010; Adebayo et al., 2023 и др.]. Это противоречие объяснимо, так как в литературе приводится эффективность роста общей фитомассы, а в настоящей работе – только фотосинтетически активной. Если рассчитать эффективность роста *W. fluitans* по нашим данным о фотосинтезе и общей фитомассе с 1 м² верхнего слоя мха из таблицы 5, то в этом случае она составит 0,0003–0,013 сут⁻¹, в среднем 0,006 сут⁻¹, и не будет отличаться от приводимых в литературе значений. Суточный R/B-коэффициент в расчете на общую фитомассу (табл. 5) уменьшается с 0,02 (табл. 3) до 0,0002–0,008, в среднем 0,004. Эта величина сопоставима с суточным R/B-коэффициентом 0,003, измененным для мха в антарктическом озере [Priddle, 1980].

Заключение

Первые лабораторные исследования интенсивности фотосинтеза и дыхания *W. fluitans* кислородным методом Винклера *in vitro* в ламбе Чудесная показали применимость этого метода в отношении погруженных макрофитов. Исследования выявили слабую метаболическую активность *W. fluitans*. Суточный R/B-коэффициент фотосинтетически активной *W. fluitans* составил лишь 0,052, эффективность роста – 0,032 сут⁻¹, R/B-коэффициент – 0,02 сут⁻¹.

На площади 1 м² *W. fluitans* за сутки поглощает 211 мг и выделяет 81,1 мг углекислоты, чистая продукция при этом составляет 129,8 мг С. Прирост биомассы был больше дыхания в 1,6 раза. В результате метаболизма *W. fluitans* с 1 м² за сутки происходило поглощение 49 мг углекислого газа из внешней среды. В разные временные периоды возможно изменение соотношения фотосинтеза и дыхания *W. fluitans* в зависимости от освещенности, температуры воды, содержания биогенных веществ. Для более точной оценки роли *W. fluitans* в балансе углерода в экосистеме ламбы Чудесная необходимо продолжить экспериментальные исследования, в том числе сезонные, а также оценить содержание абсолютно сухого вещества в сырой биомассе мха. Полученные результаты представляются весьма важными для оценки баланса углерода в дистрофных озерах, где роль мхов в продукционно-деструкционных процессах может быть значительной.

Авторы выражают благодарность М. А. Бойчук за определение видов мхов и И. Ю. Кравченко за химический анализ подготовленной для эксперимента воды.

Литература

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Ред. П. А. Лозовик, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
Бобкова К. С., Тужилкина В. В. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера // Экология. 2001. № 1. С. 69–74.

Бульон В. В. Радиоуглеродный метод определения первичной продукции фитопланктона, его возможности и ограничения в сравнении с кислородным // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 147–157.

Гутельмахер Б. Л. Метаболизм планктона как единого целого. Л.: Наука, 1986. 155 с.

Ильяшук Б. П. Сравнительное изучение роста и продукции водных мхов в закисленных озерах Южной Карелии // Экология. 1999. № 6. С. 421–425.

Комов В. Т., Лазарева В. И. Причины и последствия антропогенного закисления поверхностных вод северного региона на примере сравнительно-лимнологического исследования экосистем озер Дарвинского заповедника // Структура и функционирование экосистем кислых озер. СПб.: Наука, 1994. С. 5–30.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–593. doi: 10.7868/S0321059613060072

Adebayo A., Kiani S., Ruotsalainen A. L., Pirttilä A. M., Lehosmaa K. Growth of floating hook-moss (*Warnstorfia fluitans*) differs with nutrient and water flow adjustments in greenhouse and cold room conditions // Heliyon. 2023. Vol. 9, no. 1. e12821. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12821

Bryophyte ecology and climate change / Eds. Z. Tuba, N. G. Slack, L. R. Stark. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 506 p.

del Giorgio P. A., Cole J. J., Cimbleris A. Respiration rates in bacteria exceed phytoplankton production in unproductive aquatic systems // Nature. 1997. Vol. 385. P. 148–151.

Dilks T. J. K., Proctor M. C. F. Photosynthesis, respiration and water content in bryophytes // New Phytol. 1979. Vol. 82, no. 1. P. 97–114.

Dodds W. K., Cole J. J. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs // Aquat. Sci. 2007. Vol. 69. P. 427–439. doi: 10.1007/s00027-007-0922-1

Fowbert J. A. An experimental study of growth in relation to morphology and shoot water content in maritime Antarctic mosses // New Phytol. 1996. Vol. 133, iss. 2. P. 363–373. doi: 10.1111/j.1469-8137.1996.tb01903.x

Pakarinen P., Vitt D. H. The major organic components and caloric contents of high arctic bryophytes // Can. J. Bot. 1974. Vol. 52, no. 6. P. 1151–1161. doi: 10.1139/b74-149

Pedersen O., Colmer T. D., Sand-Jensen K. Underwater photosynthesis of submerged plants – recent advances and methods // Front. Plant Sci. 2013. Vol. 4. Art. 140. doi: 10.3389/fpls.2013.00140

Priddle L. The production ecology of benthic plants in some Antarctic lakes. I. In situ production studies // J. Ecol. 1980. Vol. 68, no. 1. P. 141–153. doi: 10.2307/2259248

Riis T., Olesen B., Katborg C. K., Christoffersen K. S. Growth rate of an aquatic bryophyte (*Warnstorfia fluitans*

(Hedw.) Loeske) from a high Arctic lake: effect of nutrient concentration // Arctic. 2010. Vol. 63, no. 1. P. 100–106. doi: 10.14430/arctic650

Welch H. E., Kalff J. Benthic photosynthesis and respiration in Char Lake // J. Fish. Res. Board Can. 1974. Vol. 31, no. 5. P. 609–620. doi: 10.1139/f74-093

References

Adebayo A., Kiani S., Ruotsalainen A. L., Pirttilä A. M., Lehosmaa K. Growth of floating hook-moss (*Warnstorfia fluitans*) differs with nutrient and water flow adjustments in greenhouse and cold room conditions. *Heliyon*. 2023;9(1):e12821. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12821

Bobkova K. S., Tuzhilina V. V. Carbon concentrations and caloric value of organic matter in northern forest ecosystems. *Russian Journal of Ecology*. 2001;32(1):63–65. doi: 10.1023/A:1009582318434

Bulion V. V. Radiocarbon method for determining phytoplankton primary production, its potentialities and limitations as compared with oxygen method. *Metodicheskie voprosy izucheniya pervichnoi produktsii planktona vnutrennikh vodoemov = Methodological issues of studying plankton primary production in inland water bodies*. St. Petersburg: Gidrometeizdat; 1993. P. 147–157. (In Russ.)

del Giorgio P. A., Cole J. J., Cimbleris A. Respiration rates in bacteria exceed phytoplankton production in unproductive aquatic systems. *Nature*. 1997;385:148–151.

Dilks T. J. K., Proctor M. C. F. Photosynthesis, respiration and water content in bryophytes. *New Phytol*. 1979;82(1):97–114.

Dodds W. K., Cole J. J. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs. *Aquat. Sci*. 2007;69:427–439. doi: 10.1007/s00027-007-0922-1

Fowbert J. A. An experimental study of growth in relation to morphology and shoot water content in maritime Antarctic mosses. *New Phytol*. 1996;133(2):363–373. doi: 10.1111/j.1469-8137.1996.tb01903.x

Gutel'makher B. L. Metabolism of plankton as a whole. Leningrad: Nauka; 1986. 155 p. (In Russ.)

Il'yashuk B. P. A Comparative study of growth and production of aquatic mosses in acidified lakes of southern Karelia. *Russian Journal of Ecology*. 1999;30(6):387–391.

Komov V. T., Lazareva V. I. Causes and consequences of anthropogenic acidification of surface waters in the northern region on the example of a comparative limnological study of the lakes ecosystems in the Darwin Reserve. *Struktura i funktsionirovanie ekosistem atsidnykh ozer = Structure and functioning of acid lake ecosystems*. St. Petersburg: Nauka; 1994. P. 5–30. (In Russ.)

Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. Methods for studying aquatic microorganisms. Moscow: Nauka; 1989. 288 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Geochemical classification of surface waters in humid zone based on their acid-base equilibrium. *Water Resources*. 2013;40(6):631–639. doi: 10.1134/S0097807813060067

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

Pakarinen P., Vitt D. H. The major organic components and caloric contents of high arctic bryophytes. *Can. J. Bot.* 1974;52(6):1151–1161. doi: 10.1139/b74-149

Pedersen O., Colmer T. D., Sand-Jensen K. Underwater photosynthesis of submerged plants – recent advances and methods. *Front. Plant Sci.* 2013;4:140. doi: 10.3389/fpls.2013.00140

Priddle L. The production ecology of benthic plants in some Antarctic lakes. I. In situ production studies. *J. Ecol.* 1980;68(1):141–153. doi: 10.2307/2259248

Riis T., Olesen B., Katborg C. K., Christoffersen K. S. Growth rate of an aquatic bryophyte (*Warnstorfia fluitans* (Hedw.) Loeske) from a high Arctic lake: effect of nutrient concentration. *Arctic.* 2010;63(1):100–106. doi: 10.14430/arctic650

Tuba Z., Slack N. G., Stark L. R. (eds). Bryophyte ecology and climate change. Cambridge: Cambridge University Press; 2011. 506 p.

Welch H. E., Kalff J. Benthic photosynthesis and respiration in Char Lake. *J. Fish. Res. Board Can.* 1974;31(5):609–620. doi: 10.1139/f74-093

Поступила в редакцию / received: 02.12.2024; принята к публикации / accepted: 26.02.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Теканова Елена Валентиновна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: etekanova@mail.ru

Здоровеннов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Зобкова Мария Валентиновна

канд. хим. наук, научный сотрудник

e-mail: rincalika21@yandex.ru

Зобков Михаил Борисович

канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Толстиков Алексей Владимирович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории географии и гидрологии

e-mail: alexeytolstikov@mail.ru

Коновалов Даниил Сергеевич

аспирант, инженер-исследователь

e-mail: konovalov.daniil1998@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Tekanova, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Zobkova, Maria

Cand. Sci. (Chem.), Researcher

Zobkov, Mikhail

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of Laboratory
of Hydrochemistry and Hydrogeology

Tolstikov, Alexey

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher, Head of Laboratory
of Geography and Hydrology

Konovalov, Daniil

Doctoral Student, Research Engineer

УДК 551.46.09 : 528.852 : 581.526.325.3 : 551.515.2

SATELLITE DATA ANALYSIS OF THE PHYTOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE VARIATIONS ON DIFFERENT TIME SCALES IN THE SOUTH CHINA SEA

E. A. Morozov^{1,2*}, H. Ye³, D. Tang^{2,3}, D. V. Pozdnyakov⁴, Y. Liu^{2,3}

¹ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences (2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia), * frisman@list.ru

² Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (1119 Haibin Road, Information Technology Park, Nansha Street, Nansha District, 511458 Guangzhou, China)

³ State Key Laboratory of Tropical Oceanography, Guangdong Key Laboratory of Ocean Remote Sensing, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (164 Xingangxi Rd, Haizhu District, 510301 Guangzhou, Guangdong, China)

⁴ Nansen International Environmental and Remote Sensing Center (14th Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034 St. Petersburg, Russia)

Here we report on our studies of chlorophyll-a in the South China Sea (SCS) and its structural features based solely on merged satellite ocean color data (Ocean Color Climate Change Initiative – OC-CCI). The SCS is largely oligotrophic, and its primary production predominantly comes from picophytoplankton. Short-term changes in the SCS picophytoplankton community structure driven by typhoon Wind Pump (WP) are studied against the background of long-term (1998–2016) space-borne OC-CCI observation data. Two ocean color data processing algorithms were applied permitting to reveal (a) the SCS total phytoplankton size structure (in terms of its contribution to chlorophyll-a (chl-a) concentration), and (b) the picophytoplankton community structure. The first algorithm is for partitioning the total chl-a in water into micro-, nano-, and picophytoplankton. The second algorithm quantifies the cell abundances of two species of prokaryotic algae – *Prochlorococcus* (Pro) and *Synechococcus* (Syn), and the entire community of eukaryotic picophytoplankton (Peuk) in the SCS. In general, a long-term trend toward an increase in chl-a of all phytoplankton size classes was observed, although the relative share of micro- and nanophytoplankton in the total amount of chl-a was minor, while the share of picophytoplankton was somewhat more pronounced. Within the picophytoplankton size class, the numbers of Syn and Peuk cells also showed a slight upward trend, whereas Pro showed a definite decrease in their numbers. The short-term dynamics caused by the passing typhoons was marked by a strong growth of chl-a along the cyclone's footprint path, with the potential to eventually promote massive phytoplankton blooms. Within the picophytoplankton size fraction, Syn and Peuk cell numbers showed some increase, while Pro cells, which proved to be resistant to poor nutrient conditions, decreased when the typhoon wind pump effect provided nutrients. The typhoon WP temporal effect on phytoplankton community structure was shown to last not more than 1 month, but usually 2–3 weeks. Our results indicate that the above two data processing algorithms are instrumental in establishing the phytoplankton community structure status and its dynamics in the SCS.

Keywords: South China Sea; Typhoons; Wind pump; Phytoplankton community structure; Merged ocean color data

For citation: Morozov E. A., Ye H., Tang D., Pozdnyakov D. V., Liu Y. Satellite data analysis of the phytoplankton community structure variations on different time scales in the South China Sea. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 111–125. doi: 10.17076/lim2060

Funding. This study was funded by the Foundation of Guangdong Science and Technology Department (2019BT2H594, 2017B030301005), state assignment to the Marine Hydrophysical Institute FNNN-2024-0012, Key Project (41430968, 41876136) of the National Natural Sciences Foundation of China, and Russian Foundation for Basic Research (20-35-70034).

Е. А. Морозов^{1,2*}, Х. Ёе³, Д. Тан^{2,3}, Д. В. Поздняков⁴, Ю. Ли^{2,3}. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТРУКТУРЫ ФИТОПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА В ЮЖНО-КИТАЙСКОМ МОРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ НА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ

¹ Морской гидрофизический институт РАН (ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011), frisman@list.ru

² Южная морская научно-инженерная лаборатория провинции Гуандун (Гуанчжоу, КНР, 511458)

³ Государственная лаборатория тропической океанографии, Гуандунская лаборатория дистанционного зондирования океана, Институт океанологии Южно-Китайского моря Академии наук Китая (Гуанчжоу, КНР, 510301)

⁴ Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена (14-я линия В. О., 7, оф. 49, Санкт-Петербург, Россия, 199034)

Проведено исследование хлорофилла *a* фитопланктона в Южно-Китайском море и его структурных особенностей, основанных исключительно на объединенных спутниковых данных о цвете океана (Ocean Colour Climate Change Initiative). Южно-Китайское море в значительной степени олиготрофно, и его первичная продукция в основном обеспечивается пикофитопланктоном. Краткосрочные изменения в структуре сообщества пикофитопланктона Южно-Китайского моря, вызванные эффектом ветрового насоса, обусловленного тайфунами, изучаются на основе многолетних (1998–2016 гг.) мультисенсорных спутниковых данных. Применены два алгоритма обработки данных о цвете океана. Первый позволяет выявить общую размерную структуру фитопланктона (с точки зрения его вклада в концентрацию хлорофилла *a* (chl-*a*)) и разделить общий chl-*a* в воде на микро-, нано- и пикофитопланктон. Второй алгоритм количественно оценивает численность клеток трех групп пикофитопланктона, а именно: двух видов прокариотических водорослей *Prochlorococcus* и *Synechococcus* и всего сообщества эукариотического пикофитопланктона (пикозеукариоты). В целом наблюдалась долгосрочная тенденция к увеличению chl-*a* всех размерных классов фитопланктона, хотя относительная доля микро- и нанопикопланктона в общем количестве chl-*a* была незначительной, в то время как доля пикопланктона была несколько более выраженной. Внутри размерного класса пикопланктона количество клеток *Synechococcus* и пикозеукариот также показало небольшую тенденцию к росту, тогда как численность *Prochlorococcus* снижалась. Краткосрочная изменчивость, вызванная влиянием прохождения тайфунов, характеризуется сильным ростом chl-*a* вдоль траектории прохождения, что в конечном итоге может способствовать массовому цветению фитопланктона и увеличению вклада более крупного фитопланктона в общую концентрацию chl-*a*. В составе пикопланктона количество клеток *Synechococcus* и пикозеукариот показало некоторое увеличение, в то время как число клеток *Prochlorococcus*, которые адаптированы к олиготрофным условиям отсутствия тайфунов, уменьшалось. Показано, что временное воздействие ветрового насоса, вызванного тайфуном, на фитопланктонное сообщество длится не более 1 месяца, обычно 2–3 недели. Полученные результаты показывают, что два вышеуказанных

алгоритма обработки данных могут играть важную роль в установлении структуры фитопланктонного сообщества и его динамики в Южно-Китайском море.

Ключевые слова: Южно-Китайское море; тайфуны; ветровой насос; структура сообщества фитопланктона; объединенные данные о цвете океана

Для цитирования: Morozov E. A., Ye H., Tang D., Pozdnyakov D. V., Liu Y. Satellite data analysis of the phytoplankton community structure variations on different time scales in the South China Sea. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 111–125. doi: 10.17076/lim2060

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось в рамках государственного задания Морского гидрофизического института РАН (FNNN-2024-0012), ключевого проекта (41430968, 41876136) Государственного фонда естественных наук Китая, а также Отделением науки и технологии фонда провинции Гуандун (2019BT2H594, 2017B030301005) и Российским фондом фундаментальных исследований (20-35-70034).

Introduction

The concentration of phytoplankton chlorophyll-a (chl-a) is traditionally considered as a valuable parameter shedding light on the ecological state of water bodies and their productivity status. In application to the problem of climate change, it is important to elucidate the role of phytoplankton in the global carbon cycle and workings of marine ecosystems. In this regard, quantitative knowledge, inter alia, on algal cell size distributions in phytoplankton communities permits to assess the rates of carbon deposition to the seabed and, consequently the efficiency of the carbon pump mechanism regulating the carbon fluxes exchange between the atmosphere and ocean [Eppley, Peterson, 1979; Liu et al., 2009; Shovonlal et al., 2013; IOCCG..., 2014].

As the world's largest marginal marine environment, the SCS (Fig. 1) substantially determines the regional climate including its carbon balance aspect [Wong et al., 2007]. At least beyond the coastal zone, this sea is an oligotrophic water body exposed to multiple external forcings including monsoonal seasonal variations in wind conditions, typhoon/tropical-cyclone Wind Pump (WP) [Li, Tang, 2022] and the Kuroshio water intrusions [Nan et al., 2015]. The typhoon WP may cause strong algal blooms even in strictly oligotrophic parts of the SCS, where such intensive blooms would not be possible otherwise.

Here we report on our study addressing such algal blooms in the SCS as local events that appear in both high primary productivity spates and alterations in the phytoplankton community structure (PCS).

Picophytoplankton is known as the most abundant algae in oligotrophic waters, but their abundance and cell size structure prove to be sensitive

to changes in the phytoplankton community composition and density, which happens due to the impact of the typhoon WP.

Numerous in situ/ship-borne studies addressed the issue of phytoplankton composition [Pan et al., 2006; Liu et al., 2007; Chen et al., 2009; Huang et al., 2010; Li et al., 2010; Lin et al., 2011; Zhang et al., 2013; Wang et al., 2016]. However, only a few investigations of this subject were based on satellite ocean color remote sensing [Pan et al., 2013; Ye, Tang, 2013; Morozov, Tang, 2019]. The in situ data available to us was used to develop the two algorithms used in the present study [Ye, Tang, 2013; Morozov, Tang, 2019].

The present research is focused on spatio-temporal variations of chl-a depending on the phytoplankton community composition in the SCS within the framework of the typhoon WP phenomenon. We employed two ocean color data processing algorithms for retrieving (a) phytoplankton cell size structure [Ye, Tang, 2013] and (b) *picophytoplankton* community structure [Morozov, Tang, 2019]. A combination of these two algorithms provided detailed insights into the PCS specific features and dynamics.

Another specific aspect of our study is that it addresses both inter- and intra-annual PCS dynamics. The inter-annual scale is intended to relate the PCS variations to some climatological parameters such as the sea surface temperature (SST), El Nino index and intensity of the Kuroshio intrusion into the SCS. The recent studies show that typhoon WPs significantly affect the marine ecosystem and induce phytoplankton blooms [Zheng, Tang, 2007; Liu et al., 2019; Xu et al., 2019].

On the intra-annual scale, we study the effect of typhoon WPs on the PCS. Previously, there have been no PCS dynamics studies done solely by means of space-borne remote sensing.

The long-term/interannual PCS variability and the factors driving it have not been well studied either. In the present paper we address both of the above issues to reveal how episodic but very intensive/powerful interventions of typhoons affected the PCS against the background of multidecadal PCS variations in the SCS.

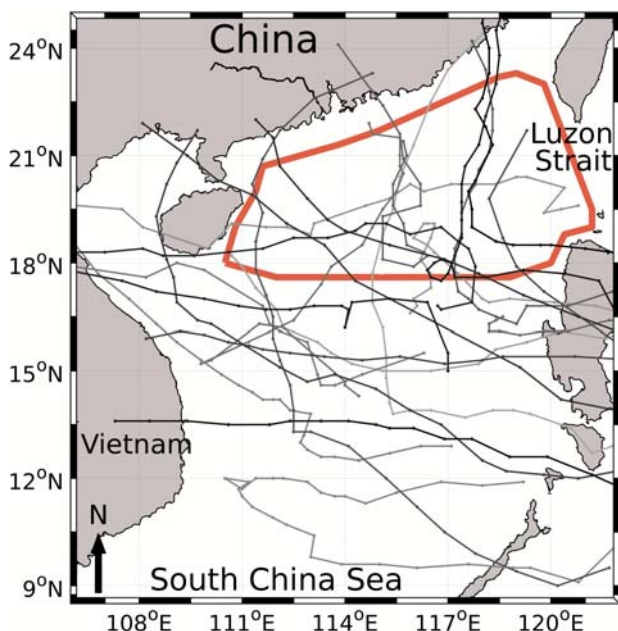


Fig. 1. Study areas in the SCS. Footprints paths of the typhoons that caused algal blooms are shown in various shades of gray. The area in the SCS within which long-term studies were performed is marked as a polygon bounded by a red line

Data sources and research methodology

Data sources

The present study is based on the merged satellite data provided by the Ocean Colour Climate Change Initiative (OC-CCI) Project [2016]. The employed OC-CCI dataset comprises level 3 images at a 4×4 km spatial resolution.

The OC-CCI dataset consolidates radiometrically and spectrally harmonized results from the level 1b, 3rd reprocessing MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) Reduced-Resolution (1 km) data, MODIS level 1A data, R2014.0.1, level 2 VIIRS data, and level 2 Local Area Coverage (1 km) and Global Area Coverage (4 km) SeaWiFS data, R2014.0 [Lee et al., 2002; Mélin, Sclep, 2015; Grant et al., 2017]. The OC-CCI data on remote sensing reflectance R_{rs} are recalculated to match the SeaWiFS spectral bands centered at 412, 443, 490, 510, 555, and 670 nm

[Grant et al., 2017]. Monthly and 8-day averaged images were used.

Additionally to OC-CCI data, satellite data on wind and sea surface temperature (SST) were used. Available at www.remss.com [Ricciardulli et al., 2011; Ricciardulli, Wentz, 2016], monthly and weekly averaged wind data are from the Advanced Scatterometer (ASCAT) launched on the EUMETSAT MetOp-A satellite and the Quick Scatterometer (Quikscat). Both the ASCAT and QuikScat data were used at monthly and weekly averaged temporal resolution in bitmap format.

MODIS Level-3 nighttime SST Standard mapped image (SMI) products were utilized [NASA..., 2010]. The product is the skin sea surface temperature in degrees Celsius retrieved from the 11μm and 12 μm spectral channels. The algorithm is based on a modified version of the nonlinear SST algorithm of Walton [Walton et al., 1998; Brown, Minnett, 1999; Kilpatrick et al., 2015]. Available at <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>, the MODIS-Aqua and MODIS-Terra data cover the entire operational time period extending, respectively, from 04 July 2002 and 24 February 2000 to present [NASA..., 2014]. The MODIS-Terra data were employed only for the time periods of gaps in the MODIS Aqua data availability.

Phytoplankton community structure algorithms

Within the PCS issue, we examined both the proportions of co-existing algal cell size classes and the species composition of the picophytoplankton size class. Two independent satellite OC data processing algorithms were used. One of them, employing a cell size class model, quantifies the percentage of chl-a contained in each of the following three cell size classes: micro-, nano-, and picophytoplankton. The second algorithm determines the cell abundance (cells/ml) in the picophytoplankton class, specifically in the aforementioned *Pro*, *Syn*, and *Peuk* species.

Algorithm for discrimination between algal cell size classes. A Three-Component Model by Ye and Tang (TCM-YT) [Ye, Tang, 2013] for phytoplankton size class analysis in application to the SCS stems from the Brewin et al. [2011] model permitting to ascribe the total chl-a ($\text{chl-a}_{\text{tot}}$) in water to three components of phytoplankton, viz. pico-, nano-, and microplankton. To derive the linear relationships between $\text{chl-a}_{\text{tot}}$ and the above cell-size classes, the TCM-YT employed *in situ* measurements obtained in both open sea and coastal areas of the SCS during different seasons; part of these data were used for the model validation. The resultant linear relationship is further used to re-estimate the distribution of $\text{chl-a}_{\text{tot}}$ between

the three size classes in order to calculate the micro-, nano-, and picophytoplankton proportions.

The TCM-YT algorithm proved to assure higher correlations and smaller errors as compared with other models when applied to the SCS. The statistical analysis shows that the Root Mean Square Errors (RMSEs) of pico-, nano- and microplankton were 17.6, 9.9 and 9.8 % of chl- a_{tot} , respectively. The TCM-YT performs well with OC-CCI input data from entire SCS, i. e. the marginal and pelagic waters [Ye, Tang, 2013].

Picophytoplankton community structure algorithm. The M&T algorithm by Morozov and Tang [2019] developed for the retrieval of cell concentrations (cell/ml) of three picophytoplankton types, namely the prokaryotic *Prochlorococcus* (*Pro*) and *Synechococcus* (*Syn*), and picoeukaryotes (*Peuk*), in the surface waters of SCS from ocean color satellite data was employed.

The incentive of choosing *Pro*, *Syn* and *Peuk* as the object of our research resides in the invariable interest of marine algologists specifically to these particular picoalgae [Chen et al., 2007, 2009, 2011; Zhang et al., 2013; Wang et al., 2016; Li et al., 2017].

The M&T algorithm is based on the spectral-response approach, exploiting the differences in the optical properties of specific algal groups even if they belong to one and the same cell-size type of phytoplankton. Indeed, it is known that the above three picoalgae have a distinctly specific pigment package composition. As a result, they differ in light harvesting. Besides, their nutrition preferences are different. These dissimilarities provide additional opportunities to identify each of them. So, the M&T performance can be substantiated by a number of predictors such as reflectance at the wavelengths of satellite sensor's channels, normalized reflectance, log-transformed normalized reflectance, band-ratios and log-transformed band-ratios, and chl- a . Level-3 merged multi-sensor Ocean Colour Climate Change Initiative satellite data were utilized for algorithm development/training. Training was performed with *in situ* data on abundances of the three picophytoplankton groups. Assessed against the training dataset and characterized via the coefficient of correlation (r) and the mean absolute percent difference (MAPD), the accuracy of retrieval of algal cell concentrations with the M&T algorithm proved to be 0.90, 0.75, and 0.74 and 34, 59, and 46 % for *Peuk*, *Pro*, and *Syn*, respectively. The regression form that assures the highest accuracy of the algorithm was chosen based on independent data cross-validation (CV). According to the CV independent data tests, the algorithm performance is characterized by r and MAPD values of 0.89, 0.72, and 0.73 and 38, 71

and 51 % for *Peuk*, *Pro*, and *Syn*, respectively [Morozov, Tang, 2019].

Data processing

Long-term data series. Monthly mean level-3 OC images were processed with the TCM-YT and M&T algorithms to retrieve the phytoplankton size structure and determine specifically the composition of the picophytoplankton size class. Applying a spatial averaging procedure (to the area marked by the red polygon in Figure 1), spatio-temporal monthly time series were obtained to compute the average annual values of the contribution (%) of micro-, nano-, and picophytoplankton to total chl- a , and the concentrations (cells/ml) of *Pro*, *Syn*, and *Peuk*. The SST and wind data were averaged similarly. The Chl- a data were taken as monthly mean images provided by the OC-CCI Project.

Typhoon events time scale. Monthly and 8-day averaged SST and OC images were taken to study PCS spatial and temporal variations associated with the algal blooms induced by the typhoon WP. The retrieved data were spatially averaged over the typhoon bloom area, which was identified by visual analysis of monthly images. Algal blooms that were apparent in the monthly image were checked for the presence of the typhoon that could have caused them. Figure 2 exemplifies outlining of a typhoon-induced algal bloom area: because the shape of the detected bloom proved to be expressly non-uniform, it was outlined as two separate areas.

As the bloom discernibility in a chl- a image may depend on the background concentrations, and thus no strict thresholds for the algal bloom selection and delineation could be confidently set, the following criteria for the algal bloom identification were employed:

- the bloom is clearly visible in the monthly average chl- a image;
- the bloom or any similar high chl- a feature (area) is not present in the same place in the monthly average image for the previous or subsequent month;
- the onset of the bloom can be tracked down to a typhoon during the analysis of wind speed weekly images.

Delineation of the algal bloom and bloom mask defining for further spatial averaging was done in monthly images. The onset and development of the phytoplankton bloom was studied in temporally averaged 8-days images with spatial averaging over the earlier defined bloom mask (see Fig. 3 for example). In total, 15 typhoon-induced algal blooms were identified. The trajectories of these typhoons are marked with gray lines in Figure 1.

The real number of typhoon-induced algal blooms in the SCS could be greater, but sometimes it was difficult to reliably identify the algal bloom and confidently attribute it to any typhoon. In some cases, algal blooms may become indiscernible because of either storm-driven sediment re-suspension, or river runoff enhancement driven by rainfall, or else the bloom associated with the Kuroshio intrusion. Such blooms were not considered as reliably identified.

3. Results and discussion

Interannual variability

In general, the long-term changes in the SCS state were characterized by a rise in both SST (Fig. 4) and chl-a (Fig. 5, a). The coefficients of correlation between the variations of SST and micro-, nano-, and picophytoplankton shares (Nm, Nn, and Np) over the entire period 2003–2016 were 0.75, 0.79, and 0.91, respectively. The observed growth of the above variables followed the increase of the El Nino index during 1998–2016, which is a manifestation of a long-term process that may be of the same nature as the phenomenon observed in connection with the Kuroshio Current. Nan et al. [2013, 2015] showed that the Kuroshio intrusion into the SCS had a weakening trend in the 1990s and 2000s. These two global oceanic hydrodynamic systems largely underlie PCS variations/changes in the SCS.

In turn, the aforementioned rise in chl-a resulted in an increase in the share of the larger (micro- and nano-) algal cell-size fractions and a decrease in the share of picoalgae in the phytoplankton community (see Fig. 5, b). Therefore, the average cell-size fraction of the phytoplankton became larger.

In terms of cell numbers, the contributions of *Peuk* and *Syn* grew while the contribution of *Pro* decreased (Fig. 6).

An increase in SST should generally lead to stronger stratification and, consequently, to less vertical mixing and lower levels of nutrients, i. e. conditions favorable for the growth of *Pro* [Ting et al., 2002; Fang et al., 2015]. This was not however actually observed in this study. Weaker intrusions of the Kuroshio waters, which are more oligotrophic and more expressly *Pro*-dominated as compared to the SCS waters, should basically correlate with higher chl-a and less *Pro* in the SCS [Li et al., 2017]. This was indeed observed in our study.

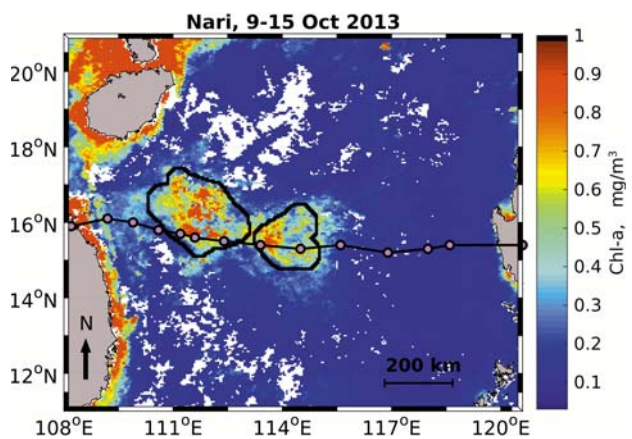


Fig. 2. Typhoon identification example. Black line with pink markers (at three-hour intervals) indicates the path of the typhoon footprint. Black solid line outlines the typhoon-induced bloom

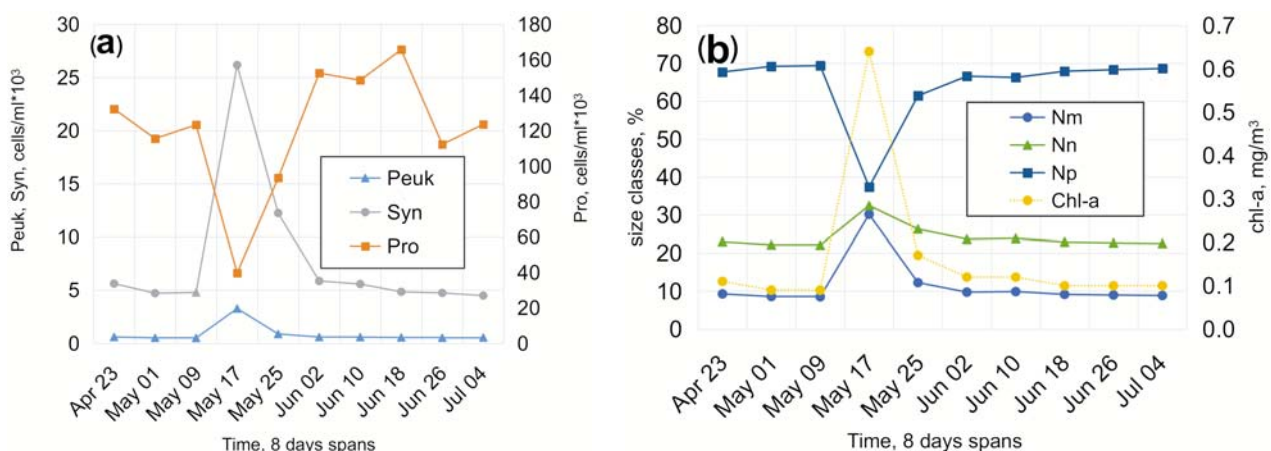


Fig. 3. Example of a weekly (8-day averages) time series of variations in the (a) – *Pro*, *Peuk* and *Syn* cell concentration; (b) – Shares of the micro-, nano- and picophytoplankton in the total chl-a. The data are averaged over the bloom area (the typhoon passage time period is 8–18 May, 2006)

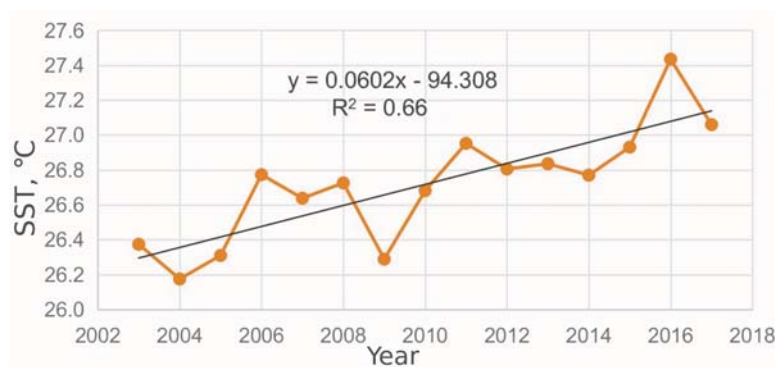


Fig. 4. Variations of the annually averaged SST. Black line is the linear trend

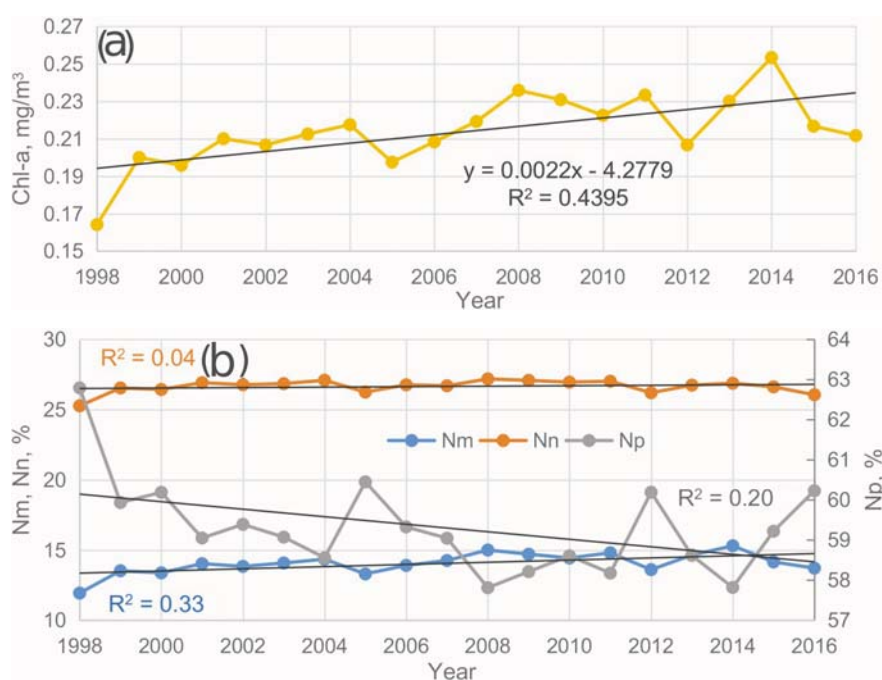


Fig. 5. Interannual variations of (a) – chl-a (yellow line); (b) – blue, orange, and gray lines denote the shares of micro-, nano-, and picoplankton in the total chl-a

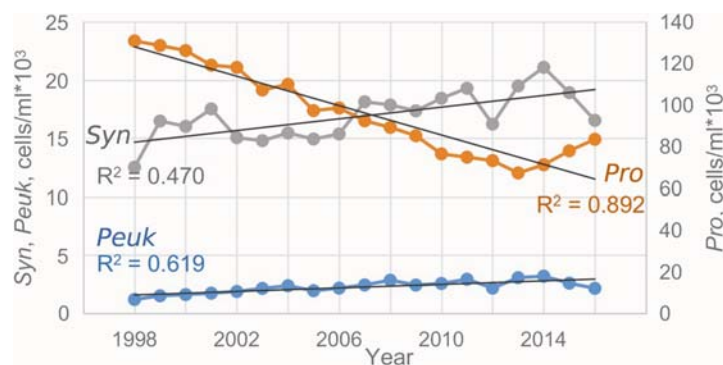


Fig. 6. Interannual variations of *Pro* (orange line), *Syn* (gray line), and *Peuk* (blue line). Black line is the linear trend

The effects produced by El Nino, SST and wind forcing, as well as alterations of the SCS thermohaline structure are arguably main drivers of the PCS long-term changes [Wang et al., 2006; Liu et al., 2015]. However, this issue is beyond the scope of our paper since it is predominantly focused on obtaining space-borne data on PCS and their analysis rather than on in-depth study of the phenomenon's forcing factors, which could be the topic for a separate study.

Seasonal variability

The relationship between the cell-size classes/groups of picophytoplankton was found distinctly expressed in the seasonal cycle the same way as in the long-term/interannual variations, viz. increases in chl-a were accompanied by rising shares of the cell-size groups, viz. Nm, Nn, *Syn*, and *Peuk*, and a reduction in *Pro* concentrations (Fig. 7).

Phytoplankton composition studies at the Southeast Asia Time-series Station in 2001–2002 and 2004–2005 [Liu et al., 2007] revealed the main features of PCS seasonal variations, similar to the intraannual variations observed by us in the SCS area. Indeed, chl-a surface concentrations showed a distinct peak in winter months: as the SST decreases, the MLD deepens and the

associated increase in the supply of nutrients follows the intensification of wind mixing. Such winter-time conditions are favorable for most types of phytoplankton with the exception of *Pro*. *Pro* is resistant to low concentrations of nutrients and rather stable light conditions that are generally typical of low MLD [Ting et al., 2002; Moore et al., 1995; Bricaud et al., 1999; Lindell and Post, 1995]. This is illustrated in Figure 7 (d, e, f): *Pro* outnumbered *Syn* and *Peuk* by one and two orders of magnitude, respectively.

Pro did not follow the common seasonal pattern of variations, and being the most abundant picophytoplankton in the area it lowered the relative contribution of picophytoplankton chl-a to the total chl-a. It is noteworthy that although the value of Np is minimal in winter and maximal in summer, the absolute chl-a values of picophytoplankton were higher in winter. The absolute chl-a values are calculated in the following way: $chl-a_x = chl-a \cdot N_x$, where the subscript x denotes the phytoplankton cell-size class (m, n, and p for micro-, nano-, and pico-, respectively); chl-a_x is the chl-a attributed to the cell-size class x; N_x is the contribution/share of algae of cell-size class x to the total chl-a.

Seasonal PCS variations were to a large extent correlated with the seasonal variations of chl-a. The contributions of cell-size classes to chl-a_{tot}

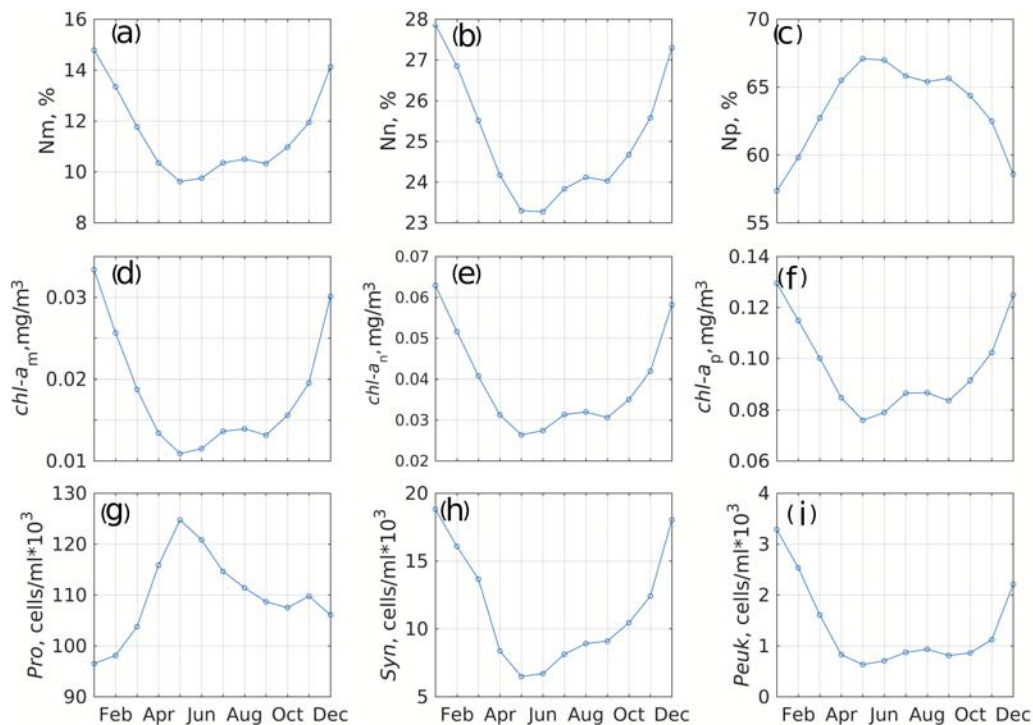


Fig. 7. Mean seasonal variations: shares of the phytoplankton cell size classes: (a) – micro-; (b) – nano-, and (c) – picophytoplankton in the total chl-a; seasonally averaged chl-a concentrations of the three cell-size classes: (d) – micro-; (e) – nano-, and (f) – picophytoplankton; cell concentrations of (g) – *Pro*, (h) – *Syn*, and (i) – *Peuk*

in our research were quantified with the TCM-YT abundance-based algorithm [Ye, Tang, 2013] and are illustrated in Figure 7 (a–c). The contributions of different picophytoplankton cell-size classes to chl- a_{tot} proved to be varying over the year. Nm and Nn were maximal in winter and minimal in summer with the difference between the lowest and highest values of about 5 % of chl- a_{tot} for both cell-size classes (Fig. 7, a, b). The Np was minimal (57 %) in winter and maximal (67 %) in summer, i. e. the difference amounted to 10 %. Although picophytoplankton became a less important contributor to chl- a_{tot} in winter, it remained the most important among the three size classes.

The patterns of seasonal variations in absolute values of chl-a concentrations contributed by each cell-size class were very similar, exhibiting one maximum in winter and two minima in May and September (Fig. 7, d–f). The chl-a of picophytoplankton varied within the range of 0.07–0.13 mg/m³ and constituted the main portion of the entire chl-a produced in the SCS over the year.

In the annual pattern of *Pro* cell concentrations there were maxima in May and November and one minimum in January (see Fig. 7, g).

Seasonal variations in *Syn* cell concentrations exhibited one maximum in January (or rather in December-January because the maxima were nearly

equal in both months) and a minimum in May, followed by a slight decline in September (Fig. 7, h).

Monthly variations in *Peuk* cell concentrations had one maximum in January and two minima occurring in May and September (Fig. 7, i).

Typhoon wind pump-induced variability

All cases. In the above sections we presented and discussed the long-term and large-scale variations in phytoplankton cell-size structure as well as the typical seasonal variations in light of the main oceanographic processes that can initiate/underlie them. This section addresses the PCS changes following the passage of typhoons that induce phytoplankton blooms.

Table 1 presents all the identified typhoon-induced blooms considered in this study. The following designations were used: *Unclear* = bloom is relatively weak and its area is difficult to delineate; *Clear* = bloom boundaries are well expressed; *Intrusion* = bloom may have been affected by the Kuroshio intrusion into the SCS; *Coastal* = bloom was caused by a typhoon WP but was likely affected by coastal run-off or near-shore sediment re-suspension. Typhoon Maria (typhoon #2) was considered together with typhoon Wukong because the bloom was mostly caused by typhoon Maria: Wukong travelled closely

Table 1. The list of typhoon WP-caused blooms and the associated information

No	Name	Typhoon dates	Bloom dates	Bloom type	Bloom duration, weeks	coast	intrusion	Bloom area, km ²	Max Chl-a 8d mean
1	Leo	27 Apr – 2 May 1999	1–16 May	Unclear	2	–	–	27,744	0.85
2	Maria (+Wukong)	28 Aug – 1 Sept 2000 5–10 Sept 2000	5–12 Sept	Unclear	1	–	–	10,832	0.25
3	Lingling	6–12 Nov 2001	11 Nov – 2 Dec	Open sea, clear, very large	3-4	–	–	89,680	0.49
4	Nepartak	13–19 Nov 2003	17 Nov – 2 Dec	Open sea, clear, weak	1-2	–	–	24,704	0.27
5	Nanmadol	28 Nov – 3 Dec 2004	24 Nov – 25 Dec	Intrusion	3-4	+	+	12,384	0.70
6	Damrey (#17)	21–27 Sept 2005	22 Sep – 7 Oct	Coastal	2	+	–	13,584	0.69
7	Kai-Tak (#22)	8 Oct – 2 Nov 2005	1–4 Nov	Open sea, clear	2-3	–	–	11,424	2.07
8	Changchu	8–18 May 2006	17 May – 1 Jun	Open sea, clear visible	1-2	–	–	48,128	0.64
9	Cimaron	27 Oct – 4 Nov 2006	1–24 Nov	Open sea, visible	2-3	–	–	12,288	0.24
10	Lekima	30 Sept – 3 Oct 2007	8 Oct – 8 Nov	Coastal	2	+	–	19,472	0.79
11	Hagibis	19–27 Nov 2007	25 Nov – 26 Dec	Open sea, visible	3-4	–	–	62,304	1.66
12	Typhoon #2	13–19 Apr 2008	14–21 April	Open sea, weak	1	+	–	73,360	0.22
13	Linfa (#3)	13–22 Jun 2009	18 Jun – 11 Jul	Open sea, clear	2-3	–	–	7,344	0.41
14	Megi	13–23 Oct 2010	24 Oct – 24 Nov	open sea, intrusion	3-4	–	–	19,216	1.41
15	Jebi	8–14 Aug 2013	28 Jul – 12 Aug	Open sea, weak	1-2	–	–	15,696	0.21
16	Nari	9–15 Oct 2013	16 Oct – 16 Nov	Open sea, clear	3-4	–	–	52,720	0.79
17	Rammasun	12–19 Jul 2014	20–28 Jul	Open sea, weak	1	–	–	61,552	0.17

to the footprint of Maria and therefore it was difficult to separate the influence of one from the other.

Since some of the bloom cases listed in Table 1 were studied by others, it was possible to obtain additional information on the conditions of bloom initiation and its development. A summary description of the blooms selected for the present study is given in Table 2, which also contains information on data sources for each bloom, its origin and the mechanism by which the bloom was produced.

Typical bloom development. A typical typhoon-induced bloom is characterized by increased chl- a_{tot} with the prevalent chl- a and cell count contribution to the phytoplankton community from larger (micro- and nano-) algal groups. At the same time, the picophytoplankton contribution decreases. Within the picophytoplankton cell-size class, the changes are multidirectional: *Synechococcus* and Picoeukaryotes cell counts increase while that of *Prochlorococcus* declines.

In the case of a typhoon WP event in the open sea, storm wind-induced water mixing and upwelling conjointly lead to an increase in both MLD and the Ekman layer depth, with a result of bringing nutrient-rich deep waters to the surface and stimulating phytoplankton growth [Zhao et al., 2008, 2009; Yang, Tang, 2010; Chen et al., 2011; Chen, Tang, 2012; Yu et al., 2013]. Another important mechanism of phytoplankton concentration increase can reside in the presence of a subsurface maximum, which becomes mixed up with the surface waters due to the typhoon-induced upwelling [Ye et al., 2013, 2018a, b; Xu et al., 2019].

Being resistant to nutrient-poor conditions, the smaller cell-sized (pico-) phytoplankton benefit from this sudden increase in nutrient availability not so much as the larger cell-sized (micro- and

nano) phytoplankton. Within the picophytoplankton community, *Syn* and *Peuk* generally benefit from the increased nutrient supply. Contrarily, *Pro*, which prefers oligotrophic stratified waters, is the only phytoplankton group that is depressed by the typhoon. Its share in chl- a_{tot} goes down, while the populations of *Syn* and *Peuk* are enlarged.

Because of its specific light harvesting system, *Pro* prefers growing at some depth [Ting et al., 2002]. Thus, an alternative or additional mechanism of downgrading the status of *Pro* in the phytoplankton community might be a sudden lifting of *Pro* cells closer to the surface due to typhoon-driven water pumping with the eventual effect of reducing the growth of these algae. While, e.g., *Syn* algae are generally distributed rather uniformly in the upper part of the euphotic zone (0–50 m), the water pumping effect alone, in the absence of nutrient enrichment, would not affect the abundance of this species [Li et al., 2017].

In some cases, the typhoon-related forcings may also include heavy rainfall resulting in intensification of river/land runoff [Zheng et al., 2007]. The Kuroshio intrusion is another possible factor capable of affecting the PCS in the SCS, e. g. case #5 [Tang et al., 1999; Li et al., 2017].

Open sea bloom induced by typhoon. One of the examples is the bloom caused by Typhoon Chanchu on 8–18 May 2006 (see Fig. 8). The phases of the onset and unfolding of the bloom were clearly distinguishable and the associated changes in the PCS could be confidently detected, quantified and interpreted. A similar example (typhoon Nari) is illustrated in Figures 2 and 3.

The 8-day-averaged spatio-temporal time series of the PCS changes induced by Typhoon #2 are presented in Figure 8 (b). The bloom lasted

Table 2. Blooms studied and reported elsewhere and the associated information

Case #	Typhoon	Typhoon Date	Reference	Bloom formation mechanism
3	Lingling	6–12 Nov 2001	Zhao et al., 2008 Yang, Tang, 2010	Strong, fast-moving typhoon
5	Nanmadol	28 Nov – 3 Dec 2004	Tang et al., 1999 (similar case)	Winter-time upwelling in Luzon Strait
6	Damrey	21–27 Sept 2005	Zheng, Tang, 2007 Zhao et al., 2009 (similar case)	Coastal runoff due to typhoon associated rainfall
7	Kai-Tak	8 Oct – 2 Nov 2005	Zhao et al., 2008 Yu et al., 2014 Yang, Tang, 2010	Weak, slow-moving typhoon
11	Hagibis	19–27 Nov 2007	Sun et al., 2010	Long forcing time, strong upwelling
13	Linfa	13–22 Jun 2009	Chen, Tang, 2012 Liu et al., 2019	Multiple passage of 1 typhoon
16	Wutip Nari	26–30 Sept 2013 9–15 Oct 2013	Ye et al., 2017	Wind mixing and upwelling

Note. Water vertical mixing and upwelling were possibly the accompanying processes in all cases of the listed typhoons.

for 2 weeks (May 17 – May 25 in Figure 8, b), and during this time period clouds did not interfere with the observations so that the data coverage was not less than 94 % (see Fig. 8, b). Data coverage is the percent of the 8-day average image covered by cloud free satellite data. The bloom started intensively in the first 8 days right after the typhoon had passed (May 18 in Fig. 8, b). The bloom exhibited all the typical features specified in section 3.3.2. In the second week (May 25 in Fig. 8, b), the bloom-induced changes in the PCS remained clearly discernible: *Pro* and *Syn* abundances were still very low and high, respectively. It is also worth noting that during the second week, the bloom was barely noticeable in the spatial distribution of chl-a (Fig. 8, b) but it stayed distinctly expressed in the patterns of the PCS parameters, especially, *Nn*, *Np*, *Pro*, and *Syn*.

Coastal zone bloom induced by typhoon. Typhoon Damrey passed the area during two weeks (21 and 27 September 2005 in Fig. 9). The coastal runoff affected the development of the typhoon-induced bloom. Figure 9 illustrates the typhoon footprint trajectory, successive bloom locations (Fig. 9, a) and the associated chl-a dynamics (Fig. 9, b). The co-occurring coastal runoff prolonged the bloom lifetime: the bloom remained very strong during two weeks with the maximum in the second week [Zheng, Tang, 2007].

Combined effect of typhoon passage and the Kuroshio intrusion. The decrease in the picophytoplankton cell numbers produced by Nanmadol typhoon (28 Nov – 3 Dec 2004) proved to be not so strong as in the two previously discussed cases (Fig. 10, a). This may be due to the intrusion of highly oligotrophic and *Pro*-rich Kuroshio waters [Li et al., 2017]. Remarkably, the most prominent bloom feature appeared in the chl-a spatial distribution prior to the actual passage of the typhoon (Fig. 10, b). So, it would be more appropriate to speak of a contribution of the invading typhoon to the already existing bloom rather than of the bloom actually triggered by the typhoon.

Typhoon-induced blooms discussed in this study can be roughly classified into three types, i.e. open-sea bloom induced by typhoon, bloom induced by typhoon with the “assistance” of coastal water nutrients, and bloom induced by typhoon with the “assistance” of the Kuroshio.

Such a classification is certainly rather speculative since in the absence of matchup oceanographical data, it is hardly possible to ascertain the nature of the processes involved in the formation of a concrete bloom. In real life, the bloom initiation is prompted either by one of such factors as proximity to the coast (for instance, in the Luzon Strait area), the Kuroshio intrusion, wintertime

Luzon Strait upwelling, or even by a combination of the said factors. Further extension of the number of studied/analyzed typhoon-related cases may be helpful in understanding the mechanisms that determine the PCS dynamics in the SCS.

Conclusions

Application of the TCM-YT and M&T retrieval algorithms to the OC CCI data permitted investigating the PCS variations in the SCS on different time scales.

Long-term (1998–2016) PCS changes followed the rise in chl-a levels that continued throughout this period and were marked by a redistribution of the shares of micro-, nano- and picophytoplankton groups in favor of the algae with a larger cell size.

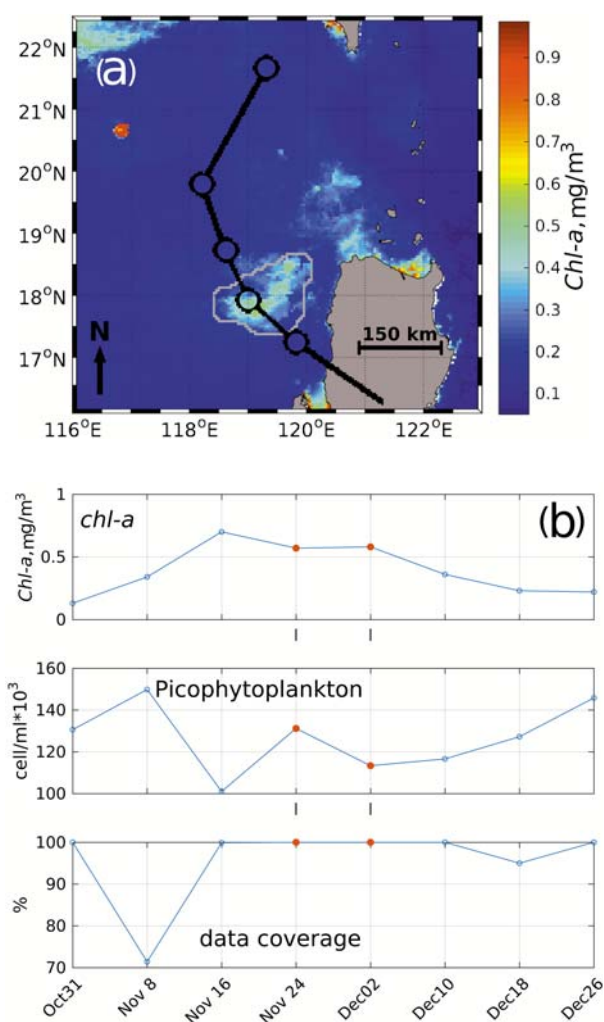


Fig. 8. Outlined area of the bloom caused by the Chan-chu typhoon (8–18 May 2006) in the oligotrophic open sea region (a); 8-day spatio-temporal time series averaged over the typhoon-induced bloom area (b). The red dot is the week of the typhoon event

Within the picophytoplankton group, the concentration of *Pro*, the smallest cell-size species, decreased while the abundance of *Syn* and *Peuk* species remained largely unaltered.

During the long-term period, similar patterns were found in the PCS seasonal variations, which indicates that the entire PCS variability was primarily due to the *Pro* algae.

Investigation of blooms initiated by typhoon WP showed that an increase in chl-a was invariably accompanied by an increase of the micro- and nanophytoplankton share in chl-a_{tot}, while picophytoplankton's share clearly tended downward. The same applies to the respective cell numbers.

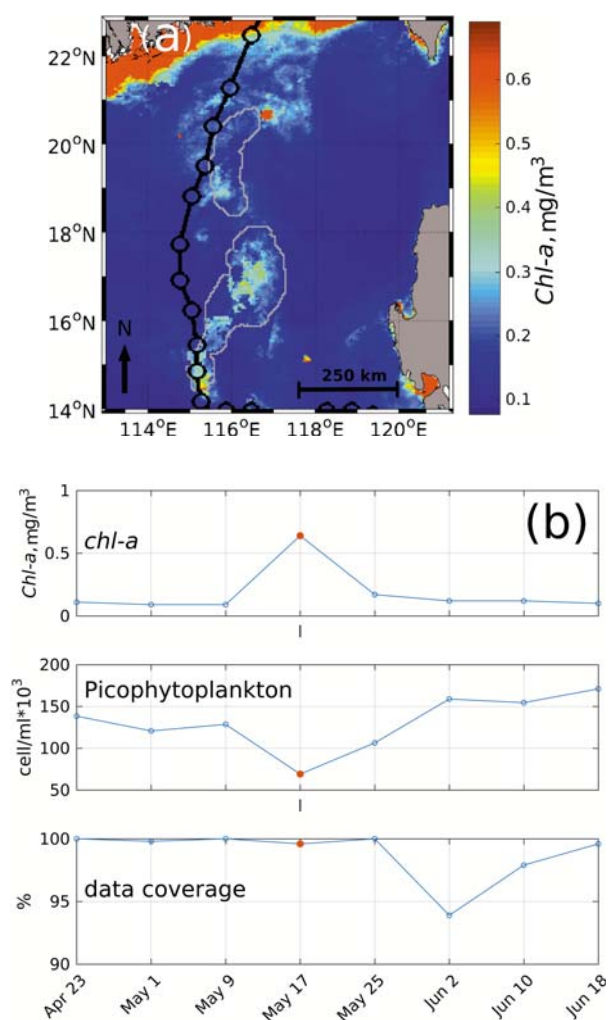


Fig. 9. Outlined areas of the bloom caused by the Damrey typhoon, which occurred in the context of enhanced land runoff and possibly bottom sediment re-suspension (a); 8-day spatio-temporal time series averaged over the typhoon-induced bloom area (b); the red dot is the week of the typhoon event

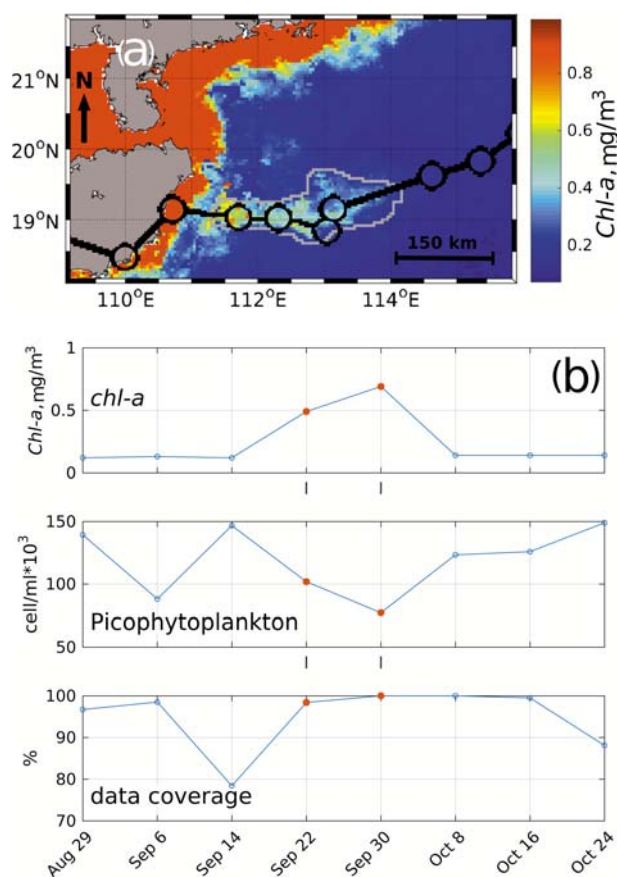


Fig. 10. Outlined areas of the bloom caused by the Nanmadol typhoon in combination with the Kuroshio intrusion (a); 8-day spatio-temporal time series averaged over the typhoon-induced bloom area (b)

It was found that the typhoon WP impact upon the PCS in the SCS extends over an area of about 100–300 km, and can last up to 4 weeks, but usually its lifetime is 2 weeks.

The results indicate that the above two data processing algorithms are instrumental in establishing the PCS status and its dynamics in the SCS, especially when respective ship-borne data with appropriate spatial coverage and time- and space resolution are unavailable.

Nevertheless, it should be noted that the intensity and spatial extent of the typhoon-driven impacts on the PCS can be fashioned by the presence of a bloom formed prior to the typhoon arrival, as well as by lifting of deep-water nutrients closer to the surface. The Kuroshio invasion, proximity to the coast or the wintertime Luzon Strait permanent upwelling can arguably augment/modulate the actual influence of the typhoon WP on the PCS in the SCS. These are the aspects of the typhoon WP phenomenon calling for further investigation.

References

- Bai Y., He X., Yu S., Chen C.-T. A. Changes in the ecological environment of the marginal seas along the Eurasian continent from 2003 to 2014. *Sustainability*. 2018;10:635. doi: 10.3390/su10030635
- Brewin R. J. W., Hardman-Mountford N. J., Lavender S. J., Raitsos D. E., Hirata T., Uitz J., Devred E., Bricaud A., Ciotti A., Gentili B. An intercomparison of bio-optical techniques for detecting dominant phytoplankton size class from satellite remote sensing. *Remote Sensing Environ.* 2011;115:325–339. doi: 10.1016/j.rse.2010.09.004
- Bricaud A., Allali K., Morell A., Marie D., Veldhuis M. J. W., Partensky F., Vaultot D. Divinyl chlorophyll a-specific absorption coefficients and absorption efficiency factors for *Prochlorococcus marinus*: kinetics of photoacclimation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1999;188: 21–32. doi: 10.3354/meps188021
- Brown O. B., Minnett P. J. MODIS infrared sea surface temperature algorithm — Algorithm Theoretical Basis Document (technical report, product MOD28). University of Miami. Miami; 1999. 83 p.
- Chen Y.-L. L., Chen H.-Y., Lin I.-I., Lee M.-A., Chang J. Effects of cold eddy on phytoplankton production and assemblages in Luzon Strait bordering the South China Sea. *J. Oceanogr.* 2007;63:671–683. doi: 10.1007/s10872-007-0059-9
- Chen B., Liu H., Landry M. R., Dai M., Huang B., Sun J. Close coupling between phytoplankton growth and microzooplankton grazing in the western South China Sea. *Limnol. Oceanogr.* 2009;54(4):1084–1097. doi: 10.4319/lo.2009.54.4.1084
- Chen X., Pan D., He X., Bai Y., Wang D. Phytoplankton bloom and sea surface cooling induced by Category 5 Typhoon Megi in the South China Sea: direct satellite observations. *Proc. SPIE 8175, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2011;817519. doi: 10.1117/12.897853
- Chen Y., Tang D. Eddy-feature phytoplankton bloom induced by a tropical cyclone in the South China Sea. *Int. J. Remote Sens.* 2012;33(23):7444–7457. doi: 10.1080/01431161.2012.685976
- Eppley R. W., Peterson B. J. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*. 1979;282:677–680.
- Fang M., Ju W., Liu X., Yu Z., Qiu F. Surface chlorophyll-a concentration spatio-temporal variations in the northern South China Sea detected using MODIS data. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 2015;26(3):319–329. doi: 10.3319/TAO.2014.11.14.01(Oc)
- Grant M., Jackson T., Chuprin A., Sathyendranath S., Zühlke M., Dingle J., Storm T., Boettcher M., Fomferra N. Ocean Colour Climate Change Initiative (OC_CCI) – Phase two, Product user guide / Plymouth Marine Laboratory. 2017. Iss. 3.1.0.
- Huang B., Hu J., Xu H., Cao Z., Wang D. Phytoplankton community at warm eddies in the northern South China Sea in winter 2003/2004. *Deep Sea Res. II: Topical Studies in Oceanography*. 2010;57(19–20): 1792–1798. doi: 10.1016/j.dsr2.2010.04.005
- IOCCG. Phytoplankton functional types from space. Sathyendranath S. (ed.). Reports of the International ocean-colour coordinating group No. 15, Dartmouth, Canada; 2014. 154 p. doi: 10.25607/OBP-106
- Kilpatrick K. A., Podestà G., Walsh S., Williams E., Halliwell V., Szczodrak M., Brown O. B., Minnett P. J., Evans R. A decade of sea surface temperature from MODIS. *Remote Sens. Environ.* 2015;165:27–41. doi: 10.1016/j.rse.2015.04.023
- Lee Z. P., Carder K. L., Arnone R. Deriving inherent optical properties from water color: A multi-band quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Appl. Opt.* 2002;41:5755–5772. doi: 10.1364/AO.41.005755
- Lindell D., Post A. F. Ultraplankton succession is triggered by deep winter mixing in the Gulf of Aqaba (Eilat) Red Sea. *Limnol. Oceanogr.* 1995;40:1130–1141. doi: 10.4319/lo.1995.40.6.1130
- Lin Q., Yin J., Huang L., Li K., Xiong L. Phytoplankton community structure in waters of continental shelf in the northwestern South China Sea in spring 2007. *J. Oceanogr. Taiwan Strait*. 2011;30(4):559–569.
- Li T., Liu S., Wang G., Cao W., Huang L., Lin Q. Species composition of phytoplankton and its distribution in the northern South China Sea in autumn. *J. Trop. Oceanogr.* 2010;29(2):65–73.
- Li J., Jiang X., Li G., Jing Z., Zhou L., Ke Z., Tan Y. Distribution of picophytoplankton in the northeastern South China Sea with special reference to the effects of the Kuroshio intrusion and the associated meso-scale eddies. *Sci. Total Environ.* 2017;589:1–10. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.208
- Li Y., Tang D. Tropical cyclone Wind Pump induced chlorophyll-a enhancement in the South China Sea: A comparison of the open sea and continental shelf. *Front. Mar. Sci.* 2022;9:1039824. doi: 10.3389/fmars.2022.1039824
- Liu H., Chang J., Tseng C.-M., Wen L.-S., Liu K. K. Seasonal variability of picophytoplankton in the Northern South China Sea at the SEATS station. *Deep Sea Res. II*. 2007;54:1602–1616. doi: 10.1016/j.dsr2.2007.05.004
- Liu H., Chang J., Tseng C.-M., Wen L.-S., Liu K. K. Seasonal variability of picophytoplankton in the Northern South China Sea at the SEATS station. *Deep Sea Res. II*. 2007;54:1602–1616. doi: 10.1016/j.dsr2.2007.05.004
- Liu M., Liu X., Ma A., Zhang B., Jing M. Spatio-temporal variability of chlorophyll-a and sea surface temperature in the northern South China Sea from 2002 to 2012. *Can. J. Remote Sens.* 2015;41(6):547–560. doi: 10.1080/07038992.2015.1112728
- Liu H., Probert I., Uitz J., Claustre H., Aris-Brosou S., Frada M., Not F., de Vargas C. Extreme diversity in noncalcifying haptophytes explains a major pigment paradox in open oceans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009;106(31):12803–12808. doi: 10.1073/pnas.0905841106
- Liu Y., Tang D., Morozov E. Chlorophyll concentration response to the typhoon Wind-Pump induced upper ocean processes considering air-sea heat exchange. *Remote Sens.* 2019;11(15):1825. doi: 10.3390/rs11151825
- Mélin F., Sclep G. Band shifting for ocean color multi-spectral reflectance data. *Optics Express*. 2015;23:2262–2279. doi: 10.1364/OE.23.002262
- Moore R. L., Goericke R., Chisholm W. S. Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochloro-*

coccus: influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1995;116:259–275. doi: 10.3354/meps116259

Morozov E., Tang D. Satellite ocean colour algorithm for *Prochlorococcus*, *Synechococcus*, and picocukaryotes concentration retrieval in the South China Sea. *Adv. Space Res.* 2019;63:16–31. doi: 10.1016/j.asr.2018.07.005

Nan F., Xue H., Chai F., Wang D., Yu F., Shi M., Guo P. Weakening of the Kuroshio intrusion into the South China Sea over the past two decades. *J. Clim.* 2013;26:8097–8110. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00315.1

Nan F., Xue H., Yu F. Kuroshio intrusion into the South China Sea: A review. *Progr. Oceanogr.* 2015;137:314–333. doi: 10.1016/j.pocean.2014.05.012

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. 2014. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) SST Data, NASA OB. DAAC. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=amod> (accessed: 15.01.2024).

NASA. Ocean Level-3 Standard Mapped Image Products, June 4. 2010. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/format/Ocean_Level-3_SMI_Products.pdf (accessed: 25.03.2024).

OC-CCI. Ocean Colour Climate Change Initiative dataset, Version 3.1.0, European Space Agency. 2016. URL: <https://www.oceancolour.org> (accessed: 10.02.2024).

Pan L. A., Zhang J., Chen Q., Deng B. Picophytoplankton community structure at a coastal front region in the northern part of the South China Sea. *J. Plankton Res.* 2006;28(3):337–343. doi: 10.1093/plankt/fbi117

Pan X., Wong G. T. F., Ho T.-Y., Shiah F.-K., Liu H. Remote sensing of picophytoplankton distribution in the northern South China Sea. *Remote Sens. Environ.* 2013;128:162–175. doi: 10.1016/j.rse.2012.10.014

Ricciardulli L., Wentz F. J., Smith D. K. Remote sensing systems QuikSCAT Ku-2011 ocean vector winds on 0.25 deg grid, Version 4. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA; 2011. URL: <https://www.remss.com/missions/qscat> (accessed: 10.01.2024).

Ricciardulli L., Wentz F. J. April 2016. Remote sensing systems ASCAT. Daily ocean vector winds on 0.25 deg grid, Version 02.1. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA; 2015. URL: <https://www.remss.com/missions/ascats> (accessed: 10.01.2024).

Shovonlal R., Sathyendranath S., Bouman H., Platt T. The global distribution of phytoplankton size spectrum and size classes from their light-absorption spectra derived from satellite data. *Remote Sens. Environ.* 2013;139:185–197. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.004

Sun L., Yang Y.-J., Xian T., Lu Z., Fu Y.-F. Strong enhancement of chlorophyll a concentration by a weak typhoon. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2010;404:39–50. doi: 10.3354/meps08477

Tang D.-L., Ni I.-H., Kester D. R., Muller-Karger F. E. Remote sensing observations of winter phytoplankton blooms southwest of the Luzon Strait in the South China Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1999;191:43–51. doi: 10.3354/meps191043

Ting C. S., Rocap G., King J., Chisholm S. W. Cyanobacterial photosynthesis in the oceans: the origins and significance of divergent light-harvesting strategies. *Trends Microbiol.* 2002;10(3):134–142. doi: 10.1016/S0966-842X(02)02319-3

Walton C. C., Pichel W. G., Sapper J. F., May D. A. The development and operational application of non-linear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites. *J. Geophys. Res.* 1998;103(C12):27999–28012. doi: 10.1029/98JC02370

Wang J., Tan Y., Huang L., Ke Z., Tan J., Hu Z., Wang Q. Response of picophytoplankton to a warm eddy in the northern South China Sea. *Oceanol. Hydrobiol. Stud.* 2016;45(2):145–158. doi: 10.1515/ohs-2016-0014

Wang C., Wang W., Wang D., Wang Q. Interannual variability of the South China Sea associated with El Niño. *J. Geophys. Res.* 2006;111:C03023. doi: 10.1029/2005JC003333

Wong G. T. F., Ku T. L., Mulholland M., Tseng C. M., Wang D. P. The South East Asian Time-series Study (SEATS) and the biogeochemistry of the South China Sea – an overview. *Deep Sea Res. II.* 2007;54:1434–1447. doi: 10.1016/j.gca.2012.08.039

Xu H., Tang D., Liu Y., Li Y. Dissolved oxygen responses to tropical cyclones ‘Wind Pump’ on pre-existing cyclonic and anticyclonic eddies in the Bay of Bengal. *Mar. Pollut. Bull.* 2019;146:838–847. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.019

Yang X., Tang D. Location of sea surface temperature cooling induced by typhoon in the South China Sea. *J. Tropic. Oceanogr.* 2010;29(4):26–31. (In Chinese). doi: 10.11978/2016045

Ye H., Kalhor M. A., Sun J., Tang D. Chlorophyll blooms induced by tropical cyclone Vardah in the Bay of Bengal. *Indian J. Geomarine Sci.* 2018a;47(07):1383–1390.

Ye H., Sheng J., Tang D., Morozov E., Kalhor M. A., Wang S., Xu H. Examining the impact of tropical cyclones on air-sea CO₂ exchanges in the Bay of Bengal based on satellite data and *in situ* observations. *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2018b;123:555–576. doi: 10.1029/2018JC014533

Ye H., Sheng J., Tang D., Siswanto E., Kalhor M. A., Sui Y. Storm-induced changes in pCO₂ at the sea surface over the northern South China Sea during Typhoon Wutip. *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2017;122:1–18. doi: 10.1002/2016JC012643

Ye H., Sui Y., Tang D., Afanasyev Y. D. A subsurface chlorophyll a bloom induced by typhoon in the South China Sea. *J. Marine Syst.* 2013;128:138–145. doi: 10.1016/j.jmarsys.2013.04.010

Ye H., Tang D. A three-component model of phytoplankton size classes for the South China Sea. *Malays. J. Sci. SCS Sp Iss.* 2013;32:319–326.

Yu J., Tang D., Chen G., Li Y., Huang Z., Wang S. The positive effects of typhoons on the fish CPUE in the South China Sea. *Continental Shelf Res.* 2014;84:1–12. doi: 10.1016/j.csr.2014.04.025

Yu J., Tang D., Li Y., Huang Z., Chen G. Increase in fish abundance during two typhoons in the South China Sea. *Adv. Space Res.* 2013;51:1734–1749. doi: 10.1016/j.asr.2012.11.019

Zhang X., Shi Z., Ye F., Zeng Y., Huang X. Picophytoplankton abundance and distribution in three contrasting periods in the Pearl River Estuary, South China. *Mar. Freshwater Res.* 2013;64:692–705. doi: 10.1071/MF12303

Zhao H., Tang D., Wang Y. Comparison of phytoplankton blooms triggered by two typhoons with different intensities and translation speeds in the South China Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2008;365:57–65. doi: 10.3354/meps07488

Zhao H., Tang D., Wang D. Phytoplankton blooms near the Pearl River Estuary induced by Typhoon Nuri. *J. Geophys. Res.* 2009;114:C12027. doi: 10.1029/2009JC005384

Zheng G., Tang D. Offshore and nearshore chlorophyll increases induced by typhoon winds and subsequent terrestrial rainwater runoff. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2007;333:61–74. doi: 10.3354/meps333061

Поступила в редакцию / received: 31.01.2025; принята к публикации / accepted: 04.03.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Морозов Евгений Александрович

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
Отдела дистанционных методов исследований

e-mail: frisman@list.ru

Йе Хайджун

канд. физ.-мат. наук, доцент

e-mail: yehaijun309@126.com

Тан Данлин

д-р физ.-мат. наук, профессор

e-mail: lingzistdl@126.com

Поздняков Дмитрий Викторович

д-р физ.-мат. наук, профессор, заместитель директора
по науке, руководитель группы водных экосистем

e-mail: dmitry.pozdnyakov@niersc.spb.ru

Лиу Ипэн

канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель

e-mail: 457123806@qq.com

CONTRIBUTORS:

Morozov, Evgenii

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Ye, HaiJun

PhD (Phys.-Math.), Associate Professor

Tang, DanLing

DSc (Phys.-Math.), Full Professor

Pozdnyakov, Dmitry

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Full Professor

Liu, YuPeng

PhD (Phys.-Math.), Assistant Professor

УДК 556.5.01 : 061.6 + 001.92 : 37 (470.22)

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР «ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ КАРЕЛИИ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ»

Л. Е. Назарова, Т. И. Регеранд*

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

Приводятся результаты научно-просветительной деятельности ИВПС КарНЦ за почти 30-летний период, начиная с 1991 года, в рамках сотрудничества с программой «Балтийский университет», работы с учителями средних школ и программой РАН, направленной на поддержку молодых специалистов. На основе предыдущего многогранного опыта научно-просветительной деятельности Отдела водных проблем (с 1991 г. – Институт водных проблем Севера, ИВПС) для ее активизации и актуализации в новом научном пространстве в 2002 году создан научно-образовательный центр «Водные объекты Карелии и методы их исследования» (НОЦ). Работа проводилась по различным направлениям с целью интеграции среднего и высшего образования с наукой и привлечения талантливой молодежи к научной работе. В задачу НОЦ входит: поддержка молодых научных сотрудников и аспирантов в проведении исследований по научным направлениям института, подготовка кадров высшей научной квалификации (работа со студентами вузов и аспирантами ИВПС), эколого-просветительная деятельность (профориентация школьников, повышение квалификации преподавателей). Результаты работы представлены на сайте ИВПС КарНЦ РАН (<http://water.krc.karelia.ru/section.php?plang=r&id=4182>).

Ключевые слова: научный институт; популяризация науки; экологическое просвещение; учащиеся; учителя; студенты; лекции

Для цитирования: Назарова Л. Е., Регеранд Т. И. Научно-образовательный центр «Водные объекты Карелии и методы их исследования» // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 126–144. doi: 10.17076/lim2014

L. E. Nazarova, T. I. Regerand*. SCIENTIFIC EDUCATION CENTER “WATER BODIES OF KARELIA AND METHODS OF THEIR RESEARCH”

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

The results of the scientific education activities conducted by NWPI KarRC RAS within the Baltic University cooperation framework, with secondary school teachers, and within the RAS program for support to young professionals are summarized over an almost 30-year period, starting 1991. Based on the previous multifaceted experience of the Department of Water Problems (reorganized since 1991 into the Northern Water Problems Institute,

NWPI) in this sphere, the Scientific Education Center (SEC) "Water Bodies of Karelia and Methods of their Research" was established in 2002 in the new scientific space to reinvigorate and modernize the activities. Several lines of activities were developed to integrate secondary and higher education with science and to draw young talents into science. The tasks of the SEC "Water Bodies of Karelia and Methods of Their Research" are to offer support to young researchers and doctoral students in conducting research in the Institute's scientific scope, provide training to highly qualified personnel (working with university students and doctoral students of the Institute) and environmental education (career guidance for schoolchildren, upskilling for teachers).

Keywords: academic institute; popularization of science; environmental education; learners; educators; students; lectures

For citation: Nazarova L. E., Regerand T. I. Scientific education center "Water Bodies of Karelia and Methods of Their Research". *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 126–144. doi: 10.17076/lim2014

Введение

В Институте водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) накоплен значительный опыт организации и проведения работы, связанной с передачей научных знаний с целью повышения уровня экологической грамотности широких слоев населения, профессионального уровня учителей средних школ республики, подготовки студентов – будущих преподавателей школ, а также специалистов администраций различного уровня учреждений республики, связанных в своей деятельности с проблемами охраны окружающей среды. Большое значение в этой работе имели мероприятия по проекту «Экологическое просвещение».

Данное направление в научных институтах было инициировано и всегда поддерживалось Российской академией наук еще с 1947 года, с начала активной деятельности Всероссийского общества «Знание», одной из основных целей которого и было распространение научных знаний. А если посмотреть в глубину истории, то и ранее – со времен М. В. Ломоносова, который видел общественный прогресс в первую очередь в развитии наук и просвещения. Он считал, что при помощи просвещения народа, развития образования можно превратить Россию в передовую страну, преодолеть отсталость, невежество, избавиться от пороков быта, социальных и нравственных язв, поднять русское самосознание, сделать науку и искусство доступными для широких народных масс, укреплять государство, повышать благосостояние народа, развивать культуру и искусство [Козиков, 2011]. Это направление деятельности научного института всегда должно иметь важнейшее значение. Как отметил президент В. В. Путин на встрече с участниками конгресса

молодых ученых 1 декабря 2022 года, «над популяризацией науки нужно постоянно работать» (<https://www.vedomosti.ru/society/news/2022/12/13/955003-putin-poruchil-nachat-rabotu-po-populyarizatsii-nauchnih-znaniy>).

В ИВПС, на основе предыдущей научно-просветительной деятельности Отдела водных проблем, в 1996 году для популяризации науки была создана инициативная группа. Цель создания группы – организация учебно-научного центра по подготовке учителей и учащихся старшей ступени к исследовательской работе, с перспективой дальнейшей работы со студентами естественного направления и подготовки в конечном итоге научных кадров для ИВПС. Инициатива научных сотрудников была одобрена и поддержана директором института Н. Н. Филатовым. Работа проводилась совместно с Карельским институтом переподготовки кадров работников образования (КИПКРО) согласно договору о сотрудничестве в рамках проекта «Наука – школе».

В 2002 г. распоряжением по ИВПС Карельского научного центра РАН от 27 марта «О создании в Институте Учебно-научного центра «Водные объекты Карелии и методы их исследования» статус инициативной группы был повышен.

В 2009 г. Положением «О научно-образовательном центре (НОЦ) учреждения РАН «Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН» проведена реорганизация Учебно-научного центра в Научно-образовательный центр (НОЦ) в связи с актуальной необходимостью и сформированными в Институте условиями для перехода на увеличение объема проведения в центре научных работ по сравнению с образовательной деятельностью. В работу включились наиболее инициативные ученые Т. И. Рegerанд, Ю. А. Сало, А. В. Литвиненко, Л. Е. Назарова, А. Ю. Тержевик, Н. М. Калинкина, Т. Н. Полякова, П. А. Лозовик, В. И. Кухарев.



А. В. Литвиненко. Урок географии «Водные объекты Карелии» в средней школе п. Шала Пудожского р-на
Alexander V. Litvinenko. A geography lesson on water bodies of Karelia in the secondary school of the village of Shala, Pudozhsky District



Ю. А. Сало. Летняя практика со студентами ПетрГУ на о. Великостров (Водлозерский национальный парк)
Yurii A. Salo. The summer internship of PetrSU students on Velikostrov Island (Vodlozersky National Park)



Л. Е. Назарова. Занятия со школьниками в экологическом лагере «Калипсо» (Водлозерский национальный парк)

Larisa E. Nazarova. Classes with schoolchildren in the Calypso Ecological Camp (Vodlozersky National Park)



А. Ю. Терзевик. Практические занятия в экологическом лагере «Старт» на оз. Пертозеро

Arkadii Yu. Terzhevik. Practical classes in the Start Ecological Camp on Lake Pertozero



Т. Н. Полякова. Лабораторная работа по гидробиологии с учениками средней общеобразовательной школы на о. Валаам

Tamara N. Polyakova. A laboratory work on hydrobiology with students of the secondary school on Valaam Island



Н. М. Калинкина. Лекция по гидробиологии для учащихся старших классов Валаамской средней школы
Nataliya M. Kalinkina. A lecture on hydrobiology for senior students of the Valaam Secondary School

Вопрос о возможности и необходимости интеграции науки и образования актуален постоянно. В связи с этим происходят различные изменения как в системе среднего и высшего образования, так и в научных учреждениях. Об исследовательской деятельности учащихся много и активно начали рассуждать специалисты психологических, педагогических наук, специалисты воспитания и дополнительного образования [Алексеев и др., 2006]. Есть ли место в научно-исследовательском институте для осуществления научно-образовательной деятельности? В каком объеме, статусе, форме и т. д.? В ИВПС Карельского научного центра такой вопрос не стоял никогда. Научные сотрудники с большим вниманием и пониманием отнеслись к своей роли наставников для учителей при организации научно-исследовательских работ со школьниками, членов жюри при оценке работ на конкурсах разного уровня, экспертов при издании научно-учебных пособий и даже воспитателей в летних экологических лагерях, работая с детьми раннего школьного возраста.

Однако в задачу НОЦ «Водные объекты Карелии и методы их исследования» кроме эколого-просветительной деятельности (профориентация школьников, повышение квалификации преподавателей) всегда входила приоритетная цель – поддержка молодых научных сотрудников и аспирантов в проведении исследований по научным направлениям института, подготовка кадров высшей научной квалификации (работа со студентами вузов и аспирантами института), возможность организации различных стажировок, в том числе зарубежных, для обновления кадров института.

Основные направления деятельности НОЦ:

- научное – участие в научной деятельности института, научных проектах, грантах и контрактах с привлечением аспирантов института, студентов вузов-партнеров, выполняющих курсовые и дипломные работы;
- теоретическое – чтение лекций по программам вузов, где научные сотрудники института ведут педагогическую деятельность (на основе договоров с вузами), а также в рамках международных проектов (при двухстороннем договоре);
- практическое – проведение практик студентов (на основе договоров с вузами-партнерами), мастер-классов с учителями средних школ;
- международное – участие в различных международных научно-образовательных программах и проектах;

- профориентационное – работа со школами (учащиеся и учителя), детскими экологическими центрами, ООПТ, административными структурами;

- информационное – подготовка печатных изданий, учебно-методических разработок, учебных пособий, инновационных информационно-образовательных программ.

Методы

Работа НОЦ осуществлялась в рамках Федеральной целевой программы Российской академии наук «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы» (ФЦП «Интеграция»), которая была учреждена указом президента Российской Федерации от 13 июня 1996 г. № 903 «О государственной поддержке интеграции высшего образования и фундаментальной науки» и направлена на углубление и расширение взаимодействия академической и вузовской науки, повышение качества образования с целью сохранения и развития научно-технического потенциала страны. Затем программа была продолжена на период 2002–2006 гг. ИВПС ежегодно участвовал в конкурсе проектов по программе и после прохождения многоэтапной независимой экспертизы выигрывал их, что давало возможность проводить конференции, полевые выезды, издавать книги и др. Получение грантов по программе также являлось свидетельством признания высокого уровня научно-просветительной или научно-образовательной деятельности ИВПС КарНЦ РАН.

Работа проводилась с рядом университетов, таких как МГУ им. Ломоносова, Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ), Карельский государственный педагогический университет (КГПУ), а затем академия (КГПА), Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, а также с Институтом повышения квалификации кадров работников образования на основе договоров о сотрудничестве.

В плане обмена опытом проведения научно-просветительных мероприятий большое значение имели международные проекты «Экологическое просвещение для учителей Карелии» с Центром окружающей среды Кайнуу (Финляндия), «Окружающая среда Балтийского региона» и «Устойчивое использование вод» (Программа «Балтийский университет») с Университетом г. Уппсала (Швеция), договоры

о сотрудничестве с Университетом г. Хельсинки (Финляндия).

В связи с изменениями различных структур, учреждений и другими ситуациями, в частности с пандемией, а также технических решений институт постоянно находил возможности перестраиваться и продолжать работу, не оставляя традиционные подходы. Особенно ярким примером, результатом которого было реальное повышение квалификации преподавателей средних школ с выдачей им сертификатов, является проведение курса лекций по договору о научно-образовательном сотрудничестве с Государственным автономным учреждением дополнительного профессионального образования Республики Карелия «Карельский институт развития образования» в 2023 году. В течение 2024 года прошел курс лекций по программе «Интеграция научных исследований со школьным образованием в области изучения водных объектов Карелии и Арктической зоны России» продолжительностью 36 часов в виде дистанционных вебинаров. Курсы предназначены для преподавателей средних школ по предметам география, биология, физика, химия, «Моя Карелия», для учителей, ведущих учебные занятия по экологии, а также учителей начальных классов. В ходе освоения программы слушатели познакомились

с теоретическими и практическими аспектами современных естественно-научных исследований на территории Карелии, а также Арктической зоны России, изучили вопросы по практике проведения экспериментальных исследований с использованием различных методик, современных измерительных приборов и программного обеспечения для анализа и представления полученных результатов.

В работе приняли участие опытные сотрудники института – М. С. Потахин, А. В. Толстиков, Р. Э. Здоровеннов, М. Б. Зобков, Е. М. Макарова, А. И. Сидорова, Г. С. Бородулина, Л. Е. Назарова, а также начинающие этот путь Ю. С. Новикова, Н. Е. Галахина и коллеги по просвещению Е. В. Кузнецова (заместитель директора по науке и экологическому просвещению заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский»), С. П. Гриппа (доцент ПетрГУ), А. В. Зимин (СПбФ ИО РАН).

На занятиях ученые ИВПС КарНЦ РАН и их коллеги, участники программы, консультировали по организации и проведению исследовательских работ, предлагали задания и проверяли их. Дистанционный метод занятий и запись лекций для свободного пользования дали возможность учителям из различных населенных пунктов Карелии получить сертификаты о повышении квалификации.



М. С. Потахин. Мастер-класс по гидрологии с участниками конференции молодых ученых на НИС «Эколог»

Maksim S. Potakhin. A master class on hydrology with participants of the conference of young scientists on board the Ekolog (Ecologist) research vessel



Е. М. Макарова. Семинар «Экологические исследования водных объектов» со школьниками в лаборатории ИВПС

Elena M. Makarova. The seminar 'Ecological research of water bodies' for schoolchildren in a laboratory of the Northern Water Problems Institute



А. В. Толстиков. Лекция для учащихся старших классов школ Петрозаводска

Aleksei V. Tolstikov. A lecture for senior school students in Petrozavodsk



А. И. Сидорова. Экскурсия для школьников в лаборатории гидробиологии ИВПС КарНЦ РАН

Anastasiya I. Sidorova. An excursion for schoolchildren to the Laboratories of Hydrobiology in the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

Договор о сотрудничестве между ИВПС и другими учреждениями системы образования и науки является основным методом организации различных видов научной и образовательной активности по направлениям:

- научно-образовательная деятельность – участие в разработке и реализации дополнительных профессиональных образовательных программ повышения квалификации учителей в области организации учебно-исследовательской деятельности в общеобразовательном учреждении, проведения полевых и лабораторных исследований;
- научно-информационная деятельность – популяризация научных достижений;
- научно-инновационная деятельность – организация и осуществление совместных научных и научно-образовательных проектов (научные школы, семинары, форумы), развитие инновационных форм взаимодействия и осуществление интеграции дополнительного профессионального образования и классической науки.

Результаты

Научные сотрудники ИВПС КарНЦ РАН и их коллеги – приглашенные лекторы начиная с 1996 года стали, таким образом, преподавателями. В программу работы были включены как теоретические лекции, так и практические занятия, экскурсии, экспедиции и индивидуальные консультации, а также издание книг, первая из которых, «Экологические исследования природных вод Карелии», была опубликована в 1999 году [Экологические..., 1999].

Поскольку деятельность НОЦ при каждом конкретном мероприятии ограничивалась возможностями института, были сформулированы основные задачи проекта: стремиться к повышению уровня экологической грамотности населения Республики Карелия; оказывать содействие в повышении профессионального уровня учителей естественного цикла предметов средних школ путем проведения теоретических семинаров, практических занятий, индивидуальных консультаций по организации и осуществлению простейших исследовательских работ; знакомить педагогов, а также учащихся старших классов с методами проведения научных исследований при использовании научно-исследовательского судна «Эколог»; подготавливать и издавать научно-информационную и научно-методическую литературу, имеющую экологическую и природоохранную тематику, предназначенную для широкого круга пользователей, интересующихся данными проблемами; поддерживать контакты по реализации проекта «Экологическое просвещение» с зарубежными коллегами ИВПС, расширяя сеть сотрудничества и создавая прямые связи между

учебными заведениями Карелии и, в частности, Финляндии.

При этом необходимо отметить уникальную особенность Научно-образовательного центра ИВПС: непрерывность обучающего процесса – от школьника, студента до аспиранта и научного сотрудника института или учителя школы, занимающегося научно-исследовательской деятельностью со своими учениками. Данный замкнутый цикл дает возможность наблюдать результаты хода обучения в центре и координировать его с учетом изменений в системе образования и развития научно-исследовательской базы ИВПС. За почти 30-летнюю деятельность этому факту есть совершенно конкретные подтверждения.

Работа со школами и высшими учебными заведениями

В связи с активизацией введения исследовательской деятельности учащихся в современное образовательное пространство, начиная примерно с 2000 года [Алексеев и др., 2001], с появлением различных методических сборников [Бреховских, 2001] возникла острая необходимость в оказании помощи учителям в организации научно-исследовательской работы школьников.

Все прошедшие годы велась активная работа с учениками средних учебных заведений г. Петрозаводска. В школах, гимназиях и лицеях города шли занятия по спецкурсу «Экология», лекции и практические занятия по гидрологии, гидробиологии, метеорологии, гидрохимии и т. д. В помощь педагогам изданы сборник статей и рекомендаций «Экологическое просвещение: от теории к практике» [2004], учебное пособие «Изучение водных объектов и природно-территориальных комплексов Карелии» [2007] и книги «Водная среда: комплексный подход к изучению, охране и использованию» [2008], «Водная среда: обучение для устойчивого развития» [2010].

Во время летних полевых сезонов сотрудники ИВПС (Ю. А. Сало, Л. Е. Назарова, А. Ю. Тержевик, Т. В. Ефремова, Н. Ю. Григорьевская) выезжали в экологические лагеря учащихся Прионежского района в п. Деревянка, в национальные парки «Водлозерский», «Паанаярви», «Кенозерский». В течение смены были ежедневные занятия по метеорологии, гидрологии, экологии; велись инструментальные наблюдения, в том числе с использованием установленной метеорологической станции, с демонстрацией гидрогеологического полевого оборудования, экспресс-лаборатории для

анализа воды, методов гидробиологических исследований. Научные сотрудники принимали активное участие в жизни лагерей и вне занятий. Экологические тропы, творческие конкурсы, вечерние песни у костров под гитару... Более 500 учащихся из Петрозаводска, Москвы, Санкт-Петербурга, Архангельской области, районов Карелии прошли обучение у сотрудников института. В том числе проводились практические занятия с детьми с ограниченными возможностями здоровья.

До настоящего времени регулярно проходят ознакомительные экскурсии в лаборатории института для учащихся средних учебных заведений, студентов ПетрГУ и Петрозаводского техникума городского хозяйства в целях профориентации представителей молодого поколения, поиска талантливой молодежи и привлечения ее к научной деятельности. В работу НОЦ включились молодые научные сотрудники А. И. Сидорова, Ю. Ю. Фомина, Л. А. Беличева, Е. М. Макарова, К. В. Исакова, В. С. Смирнова, Ю. С. Новикова.

Традиционно сотрудники ИВПС принимали участие в работе жюри по оценке школьных работ в региональных конкурсах научно-исследовательских и прикладных проектов учащихся старших классов по теме охраны и восстановления водных ресурсов. В рамках сотрудничества НОЦ ИВПС КарНЦ РАН, Отделения Русского географического общества (РГО) в Республике Карелия, кафедры географии КГПА и Методического объединения учителей географии города Петрозаводска в 2001–2013 годах организованы и проведены I, II и III Республиканские конкурсы медиапроектов «Моя малая Родина». Более 100 школьников из городов, поселков и деревень Карелии прислали свои работы по географии и краеведению. Все ребята и их педагоги получили сертификаты участников, а победители – памятные подарки. Конкурс проводили члены РГО, молодые сотрудники института А. В. Толстиков и М. С. Потахин. Взаимосвязь мероприятий НОЦ ИВПС и РГО, направленных на активизацию научно-познавательной деятельности учителей и учащихся, имеет огромное значение для развития и становления гражданской позиции молодежи, нацеленной на грамотное отношение к окружающей среде, краеведению и патриотизму. В структуре РГО работает Комиссия по географическому и экологическому образованию, которая была воссоздана в 2013 году и носит преемственный характер по отношению к профильным комиссиям, существовавшим при Императорском Русском географическом обществе и в рамках

Географического общества СССР. ИВПС КарНЦ РАН активно участвует в этой работе [Филатов, 2023], приоритетными направлениями которой являются популяризация географических и экологических знаний, издание учебно-методических материалов, стимулирование развития исследовательской и природоохранной деятельности молодежи.

Сотрудники ИВПС принимали участие в работе республиканского форума «Эффективные практики образовательной деятельности в центрах «Точка роста» и детских технопарках «Кванториум», межрегиональной конференции для школьников «Мир воды – мир человека» и т. д.

Одновременно велась активная работа и с учителями школ Республики Карелия: семинары, практики, лекции с использованием кабинета для лекционных занятий и демонстрационного оборудования, выездные полевые лагеря и, что особенно необходимо отметить, – инновационные в те годы семинары-экспедиции на научно-исследовательском судне «Эколог».

В период 2010–2015 гг. изданы такие научно-обучающие материалы, как атлас «Онежское озеро» [2010], учебное пособие «Водные объекты города Петрозаводска» [2013], сборник «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии. Лекции научных сотрудников, преподавателей и молодых ученых для вузов» [2015].

Регулярно НОЦ ИВПС принимал участие в курсах повышения квалификации преподавателей естественного цикла предметов средних школ Республики Карелия, проводимых Институтом повышения квалификации учителей. Учителя имели возможность знакомиться с научной деятельностью института, слушать лекции по гидрофизике, гидрохимии и гидробиологии, а также получать индивидуальные консультации о проведении научных исследований со школьниками. Только в течение 2009 года обучение прошли более 50 преподавателей школ республики.

В 2011 году НОЦ ИВПС инициировал многосторонний проект «Реки Петрозаводска», в работу которого включились научные сотрудники институтов КарНЦ РАН, студенты и преподаватели КГПА, учителя средних школ и общественные организации. Цель проекта – охрана внутригородских водных объектов, изучение их экологического состояния и предотвращение загрязнения, поскольку реки являются неотъемлемой частью водных ресурсов, используемых для водоснабжения населения. В 2012 году проект в связи с актуальностью

проблемы был расширен и переименован в «Водные объекты г. Петрозаводска».

Семинары, экспедиции, конференции

Традиционными и ежегодными в рассматриваемый период стали семинары-экспедиции на НИС «Эколог». Это была уникальная возможность познакомить участников (студентов вузов, учителей средних школ или старшеклассников) с оснащением научного судна, методами отбора проб по различным направлениям исследований, а также эколого-просветительной деятельностью музея-заповедника «Кижь». Особо хочется отметить два многодневных рейса в 2007 и 2009 годах и большую заслугу в их организации и проведении В. Н. Коваленко и команды НИС «Эколог».

В 2006 году ИВПС участвовал в программе Президиума РАН «Поддержка молодых ученых» и получил грант по разделу «Поддержка деятельности институтов РАН по привлечению талантливой молодежи к научной работе» на организацию и проведение научной экспедиционной школы-конференции. В 2007 году по программе данного мероприятия проведены четыре отдельные конференции в Прионежском, Пудожском, Сегежском и Кемском районах Республики Карелия. В работе конференций приняли участие около 200 человек – учителя средних школ, старшеклассники и абитуриенты. Восемь сотрудников ИВПС совместно с двумя коллегами из Университета г. Уппсала (Швеция) провели более 300 теоретических и практических занятий с демонстрацией работы экспедиционно-научного судна, полевой химической лаборатории и индивидуальным консультированием по постановке научно-экспериментальной деятельности в рамках средних учебных заведений с целью активизации заинтересованности молодого поколения в научной работе.

В 2009 году организована и проведена II Международная экспедиционная школа-конференция «Водные объекты и методы их исследования» с использованием НИС «Эколог» по маршруту Петрозаводск – Сортавальский район – Лахденпохский район – Питкяранский район – Олонецкий район – Прионежский район. В ней приняли участие около 250 человек. В состав группы преподавателей помимо шести научных сотрудников ИВПС вошли два представителя программы «Балтийский университет» из Университета г. Уппсала, доцент Петрозаводского государственного университета, преподаватель Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий,



Маршрут экспедиции 2007 г.
Expedition route in 2007

а также профессор Московского государственного университета. За 7 дней небольшим коллективом преподавателей высокой квалификации в напряженном режиме проведено около 500 теоретических и практических занятий с демонстрацией работы НИС и полевой химической лаборатории. Уникальная особенность данных мероприятий – возможность расширения аудитории, наглядная демонстрация научного потенциала и реальное объединение научной и просветительной составляющих.



И. Ю. Кравченко. Мастер-класс по определению химических показателей проб воды для школьников на борту НИС «Эколог»

Irina Yu. Kravchenko. A master class on determining chemical parameters of water samples for schoolchildren on board the Ekolog (Ecologist) research vessel



М. С. Богданова. Теоретическое занятие с учителями школ Карелии на борту НИС «Эколог»

Mariya S. Bogdanova. A theoretical lesson for teachers of schools of Karelia on board the Ekolog (Ecologist) research vessel



Международная экспедиционная школа-конференция 2009 г.
International expeditionary school-conference in 2009

Начиная с 2002 года в рамках программы работ образовательного центра сотрудники ИВПС проводили занятия с учениками и преподавателями школ Петрозаводска, выезжали в учебные заведения Прионежского района, Пряжи, Пудож, Медвежьегорска, Сегежи, Олонца, Сортавалы, Питкяранты, Лахденпохьи, Валаама, Куганаволока, п. Пяозерский. В рамках договора о сотрудничестве ИВПС КарНЦ РАН с МГУ и проекта «Подготовка экспериментально-технической базы для проведения учебной практики студентов физического факультета МГУ на Белом и Онежском озерах» ежегодно с 2004 по 2012 год проходила студенческая практика с использованием НИС «Эколог». Полученные студентами знания, практические навыки и материалы становились основой их дипломных работ.

Студенческая практика была и остается одним из важных направлений деятельности НОЦ ИВПС. Так, ежегодно с 2006 по 2012 г. по договору о сотрудничестве с Санкт-Петербургским государственным университетом низкотемпературных и пищевых технологий научные сотрудники ИВПС участвовали в проведении экологических практик студентов в Нижне-Свирском заповеднике по специальности «инженер-эколог».

В связи с многоплановостью поставленных задач по работе с молодежью ИВПС постоянно стремился расширять круг сотрудничества.

В июле 2009 года по договору с вузами и Национальным парком «Водлозерский» впервые была организована и проведена недельная межвузовская комплексная практика по гидрологии и метеорологии на о. Великостров в оз. Водлозеро. В практике приняли участие около 50 учащихся вузов из Петрозаводска, Санкт-Петербурга и Новгорода. Студенты под руководством научных сотрудников ИВПС занимались измерением расходов воды различными способами, наблюдением за уровнем воды Водлозера, установкой полевой метеостанции, наблюдением за комплексом метеопараметров, обработкой результатов комплексных наблюдений, построением графиков изменения гидрологических и метеорологических параметров, оценкой эффективности солнечных батарей, а также обсуждали полученные результаты и сдавали зачет.

Интересным комплексным экспериментом в работе НОЦ явился международный семинар с полевым выездом «Трансграничные водосборы: Финляндия и Россия – водосбор Белого моря» с экспедицией на Белое море и сессией для молодых ученых (3–6 августа 2013 г.). В нем соприкоснулись несколько форм работы, что принесло очень положительные результаты: установлены новые контакты с учреждениями высшей школы и Академии наук, в том числе и зарубежными; ИВПС КарНЦ РАН

проявил себя достойным партнером в организации и проведении научных мероприятий – как исследований, так и семинаров и конференций; аспиранты и молодые научные сотрудники имели возможность представить результаты своих исследований и познакомиться с работами коллег. И сделан крайне важный вывод: выездная форма проведения семинаров и конференций имеет свое преимущество и приветствуется всеми участниками.

Совместно с Российским государственным гидрометеорологическим университетом в рамках договора о сотрудничестве была проведена I Школа-семинар для молодежи на базе учебно-научной станции «Валаам» (11–13 июня 2015 г.).

В течение многих лет во время летнего и зимнего полевых практикумов студентов ПетрГУ и КГПА в рамках работы НОЦ ИВПС сотрудники института участвовали в выполнении комплексных научных работ, включающих гидрологические, гидрохимические, гидробиологические, гидрогеологические, геоэкологические, токсикологические исследования.

Сотрудники ИВПС также принимают активное участие в обсуждении вопросов экологического просвещения на уровне региональных

и международных конференций. В 2003 году в рамках программы «Наука – школе» была организована и проведена I Республиканская школа-конференция молодых ученых «Водная среда Карелии: исследования, использование и охрана», в работе которой приняли участие 20 учителей Республики Карелия. Изданы материалы конференции [Водная..., 2003].

Деятельность НОЦ ИВПС КарНЦ РАН по организации и проведению молодежных школ-конференций расширялась с включением в работу молодых научных сотрудников института и повышением интереса студентов, учителей и школьников к научным исследованиям и их представлению в виде докладов, презентаций и стендов, а также статей, которые публиковались в сборниках материалов конференций «Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана» [2006, 2008а, 2011]. Особенностью конференций молодых ученых ИВПС КарНЦ РАН является проведение школы-практики с участием научных сотрудников института (Ю. А. Сало, А. Ф. Балаганский, М. Т. Сярки, Ю. Ю. Фомина, Е. М. Макарова и другие) и приглашенных специалистов.



Экспедиция на Белое море 2013 г.
Expedition to the White Sea in 2013



А. Ф. Балаганский. Мастер-класс по гидрологии для участников молодежной конференции

Andrei F. Balaganskii. A master class on hydrology for participants of the youth conference



Участники конференции в Шелтозерском вепском этнографическом музее. 2008 г.

Conference participants in the Museum of Veps Ethnography in Shyoltozero

Традиционно с 2006 года молодежные конференции проводились ИВПС КарНЦ РАН в Петрозаводске осенью, а весной следующего года проходила лимнологическая школа-практика в Финляндии, на базе Университета Хельсинки «Ламми» («Lammi»). Эти конференции каждый год назывались по-разному, но с 2016 г. закрепилось название «Водные ресурсы: изучение и управление» (Water resources: research and management (WRRM)). Для организации в 2016 году V Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (лимнологическая школа-практика) было получено финансирование на конкурсной основе от РФФИ, что свидетельствует о повышении интереса аудитории и опыта организаторов, которыми стали молодые ученые, отлично справившиеся с поставленной задачей [Беличева, Толстиков, 2016]. В двухтомный сборник научных трудов конференции вошло 110 печатных работ авторов и коллективов [Водные..., 2016]. Очередную, VI Международную конференцию молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» [Регеранд и др., 2020] удалось провести в сложном 2020 году, также при поддержке РФФИ, в очно-дистанционном формате. Материалы конференции [Водные..., 2020] опубликованы в виде сборника статей, зарегистрированного в РИНЦ, и представлены на сайте ИВПС КарНЦ РАН.

Из-за сложной эпидобстановки начала 2020-х годов для проведения практического этапа конференции требовалось найти новую научную стационарную базу. Начался поиск организаций, которые могли бы предоставить условия, сопоставимые с условиями «Ламми». Рассматривалось несколько вариантов, из которых оптимальным стала база Кольского научного центра РАН (Мурманская область). Таким образом, в 2021 г. принимающей стороной зимней лимнологической школы-практики выступил Институт проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) КНЦ РАН (г. Апатиты). Мероприятие проходило на берегу озера Имандра, крупнейшего водоема Мурманской области, в 20 км от г. Апатиты. Поскольку впервые данное мероприятие планировалось провести за полярным кругом, ему дали название «Полярная школа-практика» [Толстиков и др., 2021].

От ИВПС КарНЦ РАН в работе этой школы-практики приняли участие А. В. Литвиненко, А. В. Толстиков, С. Р. Богданов, Р. Э. Здоровеннов, и что очень важно, был поддержан статус международного мероприятия, так как в дистанционном режиме выступили с лекциями Матти



Конференция 2020 г.

Conference in 2020

Леппяранта, профессор Университета Хельсинки (Финляндия) – «О специфике подледного растворенного кислорода и динамики» и Венфенг Хуань, доктор наук, доцент Университета Чанъань (Китай) – «О специфике подледного растворенного кислорода и метаболизма в мелководном засушливом районе озера».

Одним из результатов общей работы организаторов, лекторов и научных сотрудников явилось издание учебного пособия «Современные исследования водоемов Севера» [2021].

Таким образом, проводившаяся с 2006 г. Международная конференция молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (лимнологическая школа-практика) стала традиционной, одновременно обретая статус международной, и в 2023 году прошла уже в седьмой раз. Эта VII Конференция молодых ученых была включена в План основных мероприятий по развитию сотрудничества в области фундаментальной науки государств – участников СНГ на 2023–2024 годы, организована Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН и проведена на базе ФИЦ «Карельский научный центр РАН». Оргкомитет включал коллег из Петрозаводского и Вологодского государственных университетов, ИПЭН АН РТ,

ИППЭС КНЦ РАН, а также Отделения Русского географического общества в РК. Данное мероприятие соответствует задачам «Десятилетия науки и технологий 2022–2031», основными из которых являются привлечение талантливой молодежи в научную сферу, вовлечение исследователей и разработчиков в решение важнейших задач развития общества и страны, повышение доступности информации о достижениях и перспективах отечественной науки для граждан России. Общее число зарегистрировавшихся участников составило 70 человек. В работе конференции в очно-дистанционном режиме приняли участие научные сотрудники, студенты, магистранты, аспиранты и преподаватели из 17 организаций, включая научные учреждения и высшие учебные заведения Петрозаводска, Санкт-Петербурга, Вологды, Калининграда, Москвы, Апатитов, Архангельска, Перми и Ярославля [Галахина, 2023]. По материалам докладов были подготовлены научные статьи для размещения в серии «Лимнология и океанология» журнала «Труды Карельского научного центра РАН».

Конференция стала вторым этапом школы-практики полярных лимнологов, проходившей в апреле 2023 г. в Мурманской области.

Как и два года назад (в апреле 2021 г.), организацией школы занимались сотрудники Кольского и Карельского научных центров, выступая в качестве основных лекторов для студентов, аспирантов и молодых ученых. Финансовую и информационную поддержку школе оказал Проектный офис развития Арктики (ПОРА), выделив грант на проведение мероприятия и обеспечив съемку репортажа о нем. Вторая школа-практика приняла около 35 человек, включая организаторов, лекторов и слушателей из Москвы, Санкт-Петербурга, Мурманска, Апатитов, Кировска, Петрозаводска, Архангельска, Калининграда и Миасса. Участники жили и работали в загородной гостинице «Тигетта», расположенной прямо на берегу озера Имандра. В ходе теоретической части мероприятия ведущие ученые-лимнологи из Мурманской области и Карелии прочли участникам лекции по гидрологии, гидрохимии, гидрофизике, гидробиологии и геофизике, а затем на практических занятиях продемонстрировали важнейшие полевые навыки работы на льду водоема.

Помимо этого, ИВПС КарНЦ РАН неоднократно организовывал и проводил научные семинары, такие как Региональный семинар

«Связь образования и науки в подготовке новых кадров», «Трансграничные водосборы: Финляндия и Россия – водосбор Белого моря» с экспедицией на Белое море, «Развитие международного сотрудничества – наука и образование для устойчивого развития», «Море – окружающая среда и экологическая безопасность населения» и т. д. Всего с 2002 года по плану работ НОЦ ИВПС КарНЦ РАН организовано и проведено более 40 молодежных конференций, семинаров, школ-экспедиций.

Также хочется отметить сотрудничество с Национальным музеем Республики Карелия (Министерство культуры РК) в подготовке новой постоянной экспозиции музея-филиала «Марциальные воды»: цикл лекций для сотрудников, создание экспозиции в музее и двух научно-популярных учебных фильмов с каналом «Культура» с рабочим названием «Минеральные воды России» (2021 г.).

Сотрудничество с зарубежными организациями

Совместная деятельность НОЦ с зарубежными организациями, в число которых входили университеты Финляндии, Швеции, Германии,



Полярная школа-практика
Polar school and workshop

центры охраны окружающей среды Финляндии, заповедник «Дружба» и национальный парк «Коли», основывалась на тесных и плодотворных научных контактах института.

Большое значение в развитии научно-просветительной деятельности ИВПС КарНЦ РАН и научно-образовательного центра «Водные объекты Карелии и методы их исследования» имела Программа «Балтийский университет» (БУП) (The Baltic University Programme (BUP)) (<https://www.uu.se/en/collaboration-innovation/the-baltic-university-programme/about-us>). Программа была создана в 1991 г. при университете города Уппсала, старейшем в Швеции и во всей Скандинавии, основанном в 1477 году, и в 2010 г. в ней принимали участие 225 университетов 13 стран бассейна Балтийского моря [Ионов, Кропинова, 2010]. В настоящее время число участников несколько уменьшилось. Но были найдены новые пути взаимодействия между университетами, расположенными на территориях, входящих в водосбор Балтийского моря, путем содействия открытости, интернационализации и мобильности. Основное внимание в программе уделялось устойчивому развитию регионов и охране окружающей среды.

Ежегодно в разных странах региона проводились выездные совещания, экскурсии. В сентябре 1991 г. запущен первый спутниковый телевизионный учебный курс – «Балтийское море и его окружающая среда». С большим энтузиазмом около 20 лет руководил работой БУП доцент, а впоследствии профессор Ларс Рюден. Основное внимание в программе уделялось устойчивому развитию, охране окружающей среды. На базе СПбГУ и ИВПС КарНЦ РАН при содействии БУП велись разработки ГИС для создания атласов, справочников региона.

В 1992 г. впервые в ИВПС организованы удаленные, через спутниковую связь, курсы по проблемам окружающей среды. Приглашались студенты и преподаватели КГПА, ПетрГУ, институтов КарНЦ РАН, а также общества охраны природы, РГО. Созданы учебные пособия, видеофильмы и телевизионные программы, которые хранятся в ИВПС. Успешно заканчивающие курсы «Балтийского университета» при ИВПС получали соответствующий диплом. Эта активная научно-просветительская работа Института водных проблем Севера положила начало созданию Научно-образовательного центра при ИВПС, который вплоть до 2022 г. сотрудничал с БУП.

В 2006/07 учебном году на основе предшествовавшего плодотворного сотрудничества

с программой «Балтийский университет» ИВПС начал проведение самостоятельных курсов «Окружающая среда Балтийского региона» и «Устойчивое использование водных ресурсов» по программе «Балтийский университет», предназначенных для студентов КГПУ, ПетрГУ и учителей средних школ Республики Карелия с целью повышения их профессиональной подготовки и выявления молодежи, склонной к научной деятельности с учетом международного аспекта. В работу включились сотрудники всех лабораторий института. Команду НОЦ ИВПС дополнили А. В. Рыжаков, И. Ю. Кравченко, М. С. Богданова, А. П. Георгиев, Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов, А. В. Толстиков. В программу курсов входили 44 часа теоретических лекций, 20 часов практических занятий, а также экскурсии по теме курсов и экспресс-экспедиции на НИС «Эколог». По результатам работы слушатели курсов, студенты КГПА и ПетрГУ, успешно прошедшие обучение и принимающие участие в практических занятиях, экскурсиях и научных семинарах, получили дипломы «Балтийского университета», выданные совместно ИВПС КарНЦ РАН и Университетом г. Уппсала. В первый год обучение прошли 12 слушателей (4 студента и 8 преподавателей школ), а уже в следующем 2007/08 учебном году на курсы «Балтийского университета» при ИВПС поступило 36 слушателей: 27 студентов КГПУ и ПетрГУ и 9 учителей средних школ Республики Карелия. В 2014 учебном году в качестве эксперимента в работе курсов принимали участие школьники – ученики химико-биологического класса МОУ «Гимназия № 37».

Молодые сотрудники ИВПС имели возможность принять участие в научно-образовательных мероприятиях разного формата, организованных БУП. Так, в 2005 году А. В. Толстиков находился в рейсе на бриге «Фредерик Шопен», а А. И. Сидорова в 2013 году прошла стажировку в лаборатории «Эркен» Университета г. Уппсала.

В 2022 г. сотрудничество с БУП было завершено.

Сотрудничество с Университетом Хельсинки имело огромное значение в связи с проведением Международных зимних лимнологических курсов (школа-практика и семинар) на биологической станции «Ламми» [Регеранд и др., 2019]. Программа курсов была максимально насыщенной и разнообразной. Кроме теоретических лекций и практических занятий были предусмотрены и экскурсии по территории станции, знакомство с ее историей и сотрудниками. Курсы проводились на английском языке.

В течение недели более полусотни студентов и молодых ученых из России, Китая, Германии и Финляндии имели возможность прослушать около 10 лекций, провести полевые исследования на 4 озерах, сделать анализы проб воды и льда и подготовить презентации по темам. Усилиями НОЦ ИВПС за более чем 15-летний период на этих курсах побывали студенты многих университетов, даже с Дальнего Востока.

В ноябре 2002 г. началась работа по проекту, принятому к финансированию по программе ТАСИС, «Люди и окружающая среда – рука об руку в будущее: через образование к устойчивому развитию как модель для Северо-Запада России», и особое место в ней заняли рабочие контакты с Финляндией. В рамках этого проекта активно развивалось сотрудничество с Центром окружающей среды Кайнуу. Проводились семинары по экологическому просвещению в городе Каяани для учителей средних школ Карелии, аспирантов и молодых научных сотрудников ИВПС. Совместно с Университетом Хельсинки и Центром экономического развития, транспорта и окружающей среды Кайнуу проводились стажировки и лимнологические школы для студентов, преподавателей предметов естественного цикла и молодых ученых в Университете г. Оулу, Центре окружающей среды г. Лахти, Национальном парке «Коли» и заповеднике «Дружба», Академии Або г. Турку, на биологических станциях «Ламми» и «Килписъярви» Университета Хельсинки. В рамках двухстороннего договора о международном сотрудничестве с Университетом г. Хельсинки организованы и проведены шесть международных школ-семинаров «Развитие международного сотрудничества – образование для устойчивого развития».

Заключение

К сожалению, далеко не все, что было сделано за эти годы, удалось описать или хотя бы упомянуть в настоящей статье. Но очень хочется выразить огромную благодарность практически всем сотрудникам ИВПС КарНЦ РАН, поскольку столь объемная работа, проведенная за 30-летний период, коснулась в той или иной степени каждого. Особое значение имеет вклад первооткрывателей – тех, кто вошел в состав инициативной группы Учебно-научного центра, а затем и Научно-образовательного центра Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. Однако важную роль сыграли молодые сотрудники, которые нашли смелость включиться в эту работу и активно ее продолжают, читают лекции, прово-

дят практические занятия и индивидуальные консультации.

Есть пример введения научно-образовательных занятий в молодежный проект Российского научного фонда (РНФ). Так, научные сотрудники Е. М. Макарова и А. Н. Ефимова выступили на просветительской акции «ЭкоКиж», организованной для сотрудников музея и гостей о. Киж, с представлением научных результатов по гидробиологии Онежского озера в интерактивной лаборатории.

Материалы, представленные сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН, получены по гранту РНФ «Оценка современного состояния водной экосистемы Кижских шхер (в буферной зоне объекта Всемирного наследия «Кижский погост») Онежского озера по гидрохимическим и гидробиологическим показателям в условиях многолетней антропогенной нагрузки» (научный руководитель к. б. н. А. И. Сидорова). Как сообщила администрация музея-заповедника «Киж» в благодарственном письме сотрудникам института, просветительную площадку акции посетило 1685 человек, в том числе и школьного возраста. Особенно было отмечено: «Публичное представление научных результатов очень важно для современного общества. Повышается интерес населения к естественно-научным знаниям, распространяются достоверные и актуальные научные факты, появляется необходимость переосмысления личной позиции жителей в отношении экологической целесообразности своей деятельности».

Формы реализации деятельности в рамках НОЦ разнообразны и широко изменчивы в зависимости от многих факторов. Главное, что есть такие сотрудники, которые решают в первую очередь внутри себя – я ученый, и мне это надо сделать, я могу помочь учителям, школьникам, студентам понять то сложное, чем я занимаюсь каждый день.

ИВПС КарНЦ РАН выражает огромную благодарность за многолетнее плодотворное сотрудничество к. г. н. С. П. Гриппе, д. г. н. С. Б. Потахину, Е. В. Кузнецовой, д. х. н., проф. Г. Т. Фрумину, д. б. н. О. Л. Кузнецову, а также коллегам по международному сотрудничеству из Финляндии и Швеции.

Литература

Алексеев Н. Г., Леонтович А. В., Обухов А. В., Фомина Л. Ф. Концепция развития исследовательской деятельности учащихся // Исследовательская работа школьников. 2001. № 1. С. 24–34.

Алексеев Н. Г., Леонтович А. В., Обухов С. А., Фомина Л. Ф. Концепция развития исследовательской деятельности учащихся (фрагменты) // *Фізика: проблеми викладання*. 2006. № 5. С. 3–5.

Беличева Л. А., Толстиков А. В. V Международная конференция молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Лимнологическая школа-практика) (Петрозаводск, 5–8 сентября 2016 г.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 111–113.

Бреховских Л. М. Как делаются открытия // Развитие исследовательской деятельности учащихся: Методический сборник / Под общ. ред. А. С. Обухова. М.: Народное образование, 2001. С. 5–29.

Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Материалы III Региональной школы-конференции молодых ученых. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008а. 256 с.

Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Материалы IV Школы-конференции молодых ученых с международным участием (26–28 августа 2011 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 265 с.

Водная среда Карелии: исследование, использование, охрана. I Республиканская школа-конференция молодых ученых: Тезисы докладов / Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН; ред. П. А. Лозовик, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, Копистар, 2003. 142 с.

Водная среда Карелии: исследование, использование, охрана: Материалы II Республиканской школы-конференции молодых ученых (20–21 февраля 2006 г.). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. 108 с.

Водная среда: комплексный подход к изучению, охране и использованию / Редкол. Т. И. Регеранд, В. И. Кухарев, Н. Н. Филатов, М. С. Потахин, Л. Е. Назарова, Т. Н. Полякова. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008б. 155 с.

Водная среда: обучение для устойчивого развития / Ред. Н. Н. Филатов, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 182 с.

Водные объекты города Петрозаводска. Учебное пособие / Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 109 с.

Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика): Материалы V Международной конференции молодых ученых (5–8 сентября 2016 г.) / Отв. ред. Д. А. Субетто, Н. Н. Филатов, Т. И. Регеранд, Л. А. Беличева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. Т. 1. 340 с.; т. 2. 418 с.

Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика): Материалы VI Международной конференции молодых ученых (1–5 сентября 2020 г., Петрозаводск) / Отв. ред. Н. Е. Галахина, А. В. Толстиков, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 190 с.

Галахина Н. Е. VII Конференция молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (всероссийская лимнологическая школа-практика) (Петро-

заводск, 4–8 сентября 2023 г.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 138–142.

Изучение водных объектов и природно-территориальных комплексов Карелии / Ред. Н. Н. Филатов, Т. И. Регеранд, С. П. Гриппа, С. Б. Потахин. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 170 с.

Ионов В. В., Кропинова Е. Г. Международная программа «Балтийский университет» на пороге 20-летия // Балтийский регион. 2010. № 3(5). С. 92–97. doi: 10.5922/2074-9848-2010-3-10

Козилов И. А. М. В. Ломоносов о просвещении в России // Философия и общество. 2011. Вып. 4(64). С. 136–148.

Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии. Лекции научных сотрудников, преподавателей и молодых ученых для вузов / Ред. Н. Н. Филатов, Д. А. Субетто, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 222 с.

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Регеранд Т. И., Арвола Л., Леппянта М. Международные зимние лимнологические курсы (школа, практика и семинар) // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 9. С. 160–166.

Регеранд Т. И., Галахина Н. Е., Толстиков А. В. VI Международная конференция молодых ученых (школа-практика) «Водные ресурсы: изучение и управление» (Петрозаводск, 1–5 сентября 2020 г.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 133–138.

Слуковский З. И., Толстиков А. В., Денисов Д. Б., Галахина Н. Е., Вокуева С. И. Школа полярных лимнологов продолжается // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 134–137.

Слуковский З. И. Школа полярных лимнологов: впервые летняя // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 155–159.

Современные исследования водоемов Севера. Учебное пособие / Отв. ред. С. П. Гриппа, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 214 с.

Толстиков А. В., Галахина Н. Е., Слуковский З. И. Полярная школа-практика (Апатиты, 11–17 апреля 2021 г.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 9. С. 174–177.

Филатов Н. Н. Деятельность Отделения Русского географического общества в Республике Карелия, основанная на научных принципах // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 117–133.

Экологические исследования природных вод Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова, А. К. Морозова, В. И. Кухарева, Ю. А. Сало, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 108 с.

Экологическое просвещение: от теории к практике / Отв. ред. Т. И. Регеранд, Л. И. Фрадкова. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2004. 134 с.

References

Alekseev N. G., Leontovich A. V., Obukhov A. V., Fomina L. F. The development concept of research activities of students. *Issledovatel'skaya rabota shkol'nikov = Research work of schoolchildren*. 2001;1:24–34. (In Russ.)

- Alekseev N. G., Leontovich A. V., Obukhov S. A., Fomina L. F. The development concept of research activities of students (fragments). *Fizika: problemy vykladaniya = Physics: Teaching Problems*. 2006;5: 3–5. (In Russ.)
- Belicheva L. A., Tolstikov A. V. The 5th International young scientists conference *Water resources: research and management* (WRRM) (limnological school and workshop) (Petrozavodsk, September 5–8, 2016). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;9:111–113. (In Russ.)
- Brekhovskikh L. M. How discoveries are made. *Razvitie issledovatel'skoi deyatel'nosti uchashchikhsya: Metodicheskii sbornik = Development of students' research activity: a collection of instructional materials*. Moscow: Narodnoe obrazovanie; 2001. P. 5–29. (In Russ.)
- Filatov N. N. (ed.). Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)
- Filatov N. N. Science-based activities of the Republic of Karelia Branch of the Russian Geographical Society. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023;6: 117–133. (In Russ.)
- Filatova N. N., Morozova A. K., Kukhareva V. I., Salo Yu. A., Regerand T. I. (eds.). Environmental research of natural waters of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. 108 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Regerand T. I. (eds.). Aquatic environment: Education for sustainable development. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 182 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Regerand T. I., Grippa S. P., Potakhin S. B. (eds.). Study of water bodies and spatial natural in Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 170 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Subetto D. A., Regerand T. I. (eds.). Seas, lakes and transboundary catchments of Russia, Finland and Estonia. Lectures by researchers, teachers and young scientists for university students. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 222 p. (In Russ.)
- Galakhina N. E., Tolstikov A. V., Regerand T. I. (eds.). Water resources: research and management (school and workshop). *Materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh (1–5 sent. 2020 g., Petrozavodsk) = Proceedings of the VI International conference of young scientists (Sept. 1–5, 2020, Petrozavodsk)*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 190 p. (In Russ.)
- Galakhina N. E. 7th International conference of young scientists *Water resources: research and management* (All-Russian limnological hands-on school) (Petrozavodsk, September 4–8, 2023). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023;6:138–142. (In Russ.)
- Grippa S. P., Regerand T. I. (eds.). Current research of water bodies of the North. A textbook. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. 214 p. (In Russ.)
- Ionov V. V., Kropinova E. G. The International program *Baltic University* is on the threshold of its 20th anniversary. *Baltiiskii region = Baltic Region*. 2010;3(5):92–97. (In Russ.) doi: 10.5922/2074-9848-2010-3-10
- Kozikov I. A. M. V. Lomonosov on education in Russia. *Filosofiya i obshchestvo = Philosophy and Society*. 2011;4(64):136–148. (In Russ.)
- Litvinenko A. V., Regerand T. I. (eds.). Water bodies of the city of Petrozavodsk. A textbook. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 109 p. (In Russ.)
- Lozovik P. A., Regerand T. I. (eds.). Water environment of Karelia: research, management, and protection. *I Respublikanskaya shkola-konferentsiya molodykh uchenykh: Tezisy dokladov = I Republican school-conference of young scientists: Proceed.* NWPI of the KarRC of the Russian Academy of Sciences. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2003. 142 p.
- Regerand T. I., Arvola L., Leppäranta M. International scientific and teaching collaboration: Winter limnology course at the Lammi Biological Station. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;9:160–166. (In Russ.)
- Regerand T. I., Fradkova L. I. (eds.). Environmental education: from theory to practice. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. 134 p. (In Russ.)
- Regerand T. I., Galakhina N. E., Tolstikov A. V. 6th International young scientists conference (school and workshop) *Water resources: research and management* (Petrozavodsk, September 1–5, 2020). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;9:133–138. (In Russ.)
- Regerand T. I., Kukharev V. I., Filatov N. N., Potakhin M. S., Nazarova L. E., Polyakova T. N. (eds.). Water environment: an integrated approach to research, protection, and management. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 155 p. (In Russ.)
- Slukovskii Z. I. Polar Limnologists School: the first time in summer. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024;5:155–159. (In Russ.)
- Slukovskii Z. I., Tolstikov A. V., Denisov D. B., Galakhina N. E., Vokueva S. I. Polar Limnologists School continues. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023;6:134–137. (In Russ.)
- Subetto D. A., Filatov N. N., Regerand T. I., Belicheva L. A. (eds.). Water resources: research and management (Limnological school and workshop). *Materialy V Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh (5–8 sent. 2016 g.) = Proceedings of the V International conference of young scientists (Sept. 5–8, 2016)*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2016. Vol. 1. 340 p.; vol. 2. 418 p. (In Russ.)
- Tolstikov A. V., Galakhina N. E., Slukovskii Z. I. Polar school and workshop (Apatity, April 11–17, 2021). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2021;9: 174–177. (In Russ.)
- Water environment and spatial natural complexes: research, management, and protection. *Materialy III Regional'noi shkoly-konferentsii molodykh uchenykh = Proceedings of the III Regional school-conference of young scientists*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 256 p. (In Russ.)

Water environment and spatial natural complexes: research, management, and protection: *Materialy IV Shkoly-konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem (26–28 avgusta 2011 g.) = Proceedings of the IV School-conference of young scientists with int. part. (August 26–28, 2011).* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 265 p. (In Russ.)

Water environment and spatial natural complexes: research, management, and protection. *Materialy II Respublikanskoi shkoly-konferentsii molodykh uchenykh (20–21 fevralya 2006 g.) = Proceedings of the II Republican school-conference of young scientists (Feb. 20–21, 2006).* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. 109 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 13.02.2025; принята к публикации / accepted: 21.02.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Назарова Лариса Евгеньевна

канд. геогр. наук

e-mail: larianazarov@yandex.ru

Регеранд Татьяна Ивановна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научно-организационной работе

e-mail: regerand@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Nazarova, Larisa

Cand. Sci. (Geog.)

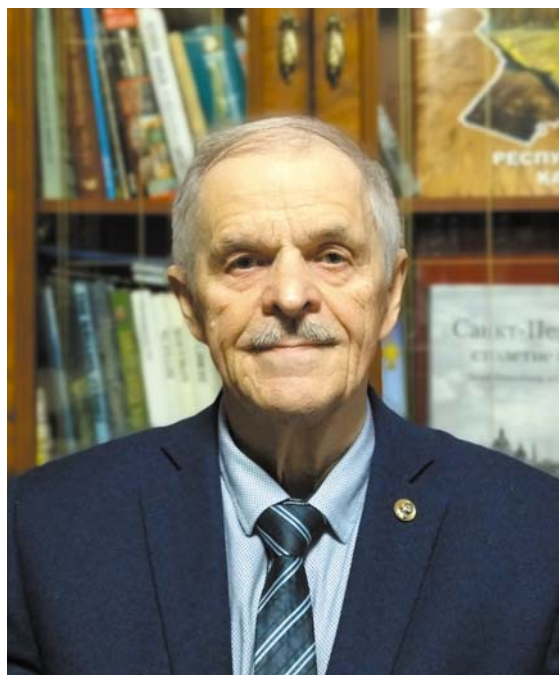
Regerand, Tatyana

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Deputy Director for Research Administration

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ ФИЛАТОВ (к 80-летию со дня рождения)

9 апреля 2025 г. отмечает юбилей член-корреспондент РАН, профессор, доктор географических наук, главный научный сотрудник Института водных проблем Севера КарНЦ РАН Н. Н. Филатов.

Николай Николаевич родился в 1945 г. в Ленинграде. В 1965 г. окончил Ленинградский топографический техникум, работал техником-топографом, освобожденным секретарем комсомольской организации Предприятия №10 ГУГК. В 1971 г. завершил обучение на кафедре океанологии географического факультета Ленинградского государственного университета, получил направление в Морскую гидрографию в г. Ломоносов, но по предложению заведующего кафедрой океанологии ЛГУ Героя Советского Союза В. Х. Буйницкого и профессора Н. А. Лабзовского был приглашен в аспирантуру созданного в том же году Института озероведения АН СССР. В 1974 г. Н. Н. Филатов успешно защитил на географическом факультете ЛГУ кандидатскую диссертацию по исследованию гидродинамики Ладожского озера. Его учителями в университете и аспирантуре были В. Х. Буйницкий, Н. А. Лабзовский, В. А. Рожков, Л. А. Тимохов, В. Р. Фукс, Р. Г. Григоркина, А. А. Дмитриева, В. В. Клепиков. Большое влияние на становление Н. Н. Филатова как ученого оказали чл.-корр. РАН О. А. Алекин, академики А. С. Саркисян, О. Ф. Васильев, К. Я. Кондратьев. По окончании аспирантуры Николай Николаевич работал в ИНОЗ сначала в должности младшего, а затем старшего научного сотрудника. Он провел исследования термогидродинамических процессов и явлений на крупнейших озерах Европы по разработанным им программам «Большие озера СССР», «Ладэкс», «Онего», а также комплексное изучение озера Севан (Севанская проблема), озер Балхаш, Красное,



Рыбинского водохранилища, озер Финляндии, Болгарии и Канады. В 1970–80-х годах Николай Николаевич работал приглашенным специалистом в Канадском центре внутренних вод, в институтах Финляндии, Болгарии, ГДР, Швеции, Дании, в Международном институте системного анализа (Австрия). В результате обобщения исследований им изучены закономерности гидродинамики вод в разнотипных озерах, получены новые представления о течениях, внутренних волнах, апвеллингах, мелкомасштабной турбулентности в разнотипных озерах. Сотрудничество с академиком А. С. Саркисяном и его учениками позволило внедрить в лимнологию методы гидродинамического синтеза наблюдений и моделирования, разработанные для океана.

Н. Н. Филатов принимал участие в экспериментах по программе ГКНТ «Разрезы» (рук. академик Г. И. Марчук), направленных на калибровку и верификацию разнообразных моделей океана. Выполнены эксперименты для решения принципиальных вопросов формирования, генерации, устойчивости, широкого класса гидродинамических процессов и явлений озер. Результаты моделирования и экспериментов легли в основу блока «перемешивание, водообмен» моделей экосистем озер Севан, Онежское, Ладожское, Балхаш, Варненское (Болгария), Несьярви (Финляндия) для оценки состояния и изменений экосистем этих озер при разных сценариях антропогенных воздействий и изменений климата.

В 1983 г. в издательстве «Гидрометеиздат» вышла его первая монография «Динамика озер», которая явилась обобщением выполненных исследований. В том же году Н. Н. Филатов переходит из лаборатории гидрофизики в лабораторию дистанционных методов ИНОЗ, созданную академиком К. Я. Кондратьевым. Он участвует в исследованиях по программам «Интеркосмос», «Разрезы», принимает участие в реализации уникальных экспериментов на ряде озер мира по использованию разнообразных (в видимом, ИК, тепловом, радио- и др. диапазонах) дистанционных методов в гидрологии. Внедрены в практику методы спутниковой лимнологии. По данным изучения явлений на поверхности озер показаны возможности восстановления термогидродинамических процессов и полей в толще озерных вод. Им исследованы малоизученные ранее в лимнологии явления и процессы (когерентные структуры в озерах, вихри, внутренние волны, фронты, апвеллинги, особенности распространения и трансформации сточных, загрязненных вод), разработан метод оперативного диагноза циркуляции вод по данным дистанционного зондирования.

В 1988 г. Николай Николаевич принимает неожиданное для многих решение – уезжает из родного Ленинграда и по конкурсу становится заведующим Отделом водных проблем Карельского филиала АН СССР в Петрозаводске. В 1991 г. в издательстве «Наука» выходит его монография «Гидродинамика озер», написанная по докторской диссертации, которую он защитил в том же году на географическом факультете МГУ. Тогда же Н. Н. Филатов становится директором-организатором Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, созданного на базе Отдела, который он возглавлял. Институт активно сотрудничает со многими ведущими институтами и

университетами как нашей страны (СПбГУ, МГУ, ИНОЗ, ИО, ИВМ, ИВП, ММБИ РАН и др.), так и зарубежных стран, в первую очередь с Канадским центром внутренних вод, Институтом окружающей среды Финляндии, университетами городов Лунд и Уппсала (Швеция) и др. В 1991 г. ИВПС КарНЦ РАН становится соучредителем Международного центра по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена в Санкт-Петербурге. Под руководством и при непосредственном участии Н. Н. Филатова в рамках программ фундаментальных исследований РАН, а также грантов РФФИ, ИНТАС, ТАСИС выполнен цикл работ по изучению влияния климата и антропогенных факторов на экосистемы водоемов. По результатам исследований определены особенности нестационарности гидрологического режима озер, элементов водного баланса и уровня крупнейших озер Европы. Выявлены закономерности изменения водных экосистем Ладожского и Онежского озер при разных сценариях изменений климата. Результаты совместных с Нансеновским центром исследований озер мира с применением дистанционных методов были обобщены в монографии «Limnology and Remote sensing» под редакцией К. Я. Кондратьева и Н. Н. Филатова и опубликованы в издательстве Springer-Praxis в 1999 г. Под руководством Н. Н. Филатова выполнен широкий комплекс исследований и дана оценка водоресурсного потенциала Европейского Севера России как одного из важнейших факторов размещения производительных сил, осуществлен большой комплекс работ по Общероссийской программе улучшения водоснабжения населения Севера РФ с использованием поверхностных и подземных вод. С применением ГИС-технологий выполнена классификация качества воды разнообразных озер, созданы электронные реестры, каталоги, базы данных, информационно-справочные системы о реках, озерах, которые внедрены в практическую деятельность ряда министерств.

В трудные 1990-е годы Николай Николаевич возглавил комплексные системные исследования Белого моря по ряду международных и российских проектов, таких как ИНТАС, ИНКО-Коперникус, РФФИ. Совместно с ААНИИ, ИО РАН, ИВП, Нансеновским центром, а затем с ИВМ РАН проведены комплексные натурные исследования термогидродинамики и экосистемы Белого моря, разработаны и внедрены математические модели для изучения экосистемы Белого моря, даны прогнозы изменения экосистем моря при разных сценариях изменений климата и развития экономики региона.

Эти исследования были обобщены и опубликованы в коллективных монографиях под его авторством и редакцией как в нашей стране – «Белое море и водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов» (2007 г.), так и за рубежом – «White Sea: Its Marine environment and Ecosystem dynamics influenced by global change» (2005 г.). В дальнейшем Н. Н. Филатов участвует в реализации программ «Мировой океан» (рук. академик Г. Г. Матишов) и «Система Белое море» (рук. академик А. П. Лисицын), сотрудничает с чл.-корр. РАН Ю. С. Долотовым по изучению эстуариев Белого моря. В 2000-х гг. сотрудничает с академиками В. П. Дымниковым и А. С. Саркисяном из ИВМ РАН в разработке информационной системы для Белого моря и водосбора. На Белом море на борту НИС «Эколог» проведены семинары, подготовлена программа создания экспертной системы для изучения морей на основе модели, разработанной в ИВМ РАН (FEMAO), и базы данных, созданной в ИВПС КарНЦ РАН. В настоящее время такая модель разрабатывается в КарНЦ РАН совместно с ИВМ РАН.

Большой цикл работ выполнен им совместно с профессорами Л. А. Руховцом и В. В. Меншуткиным по внедрению математических моделей для прогноза изменений экосистем Великих озер Европы – Ладожского и Онежского, а также применению методов теории искусственного интеллекта для изучения малоисследованных озер, когнитивных моделей для изучения сложных социо-эколого-экономических моделей «море–водосбор». Результаты опубликованы в совместных монографиях: «Ladoga And Onego - Great European Lakes: Modeling and Experiment» (London: Springer-Praxis, 2010); «Озера и климат: модели и методы» в кн. «Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы» (М.: Наука, 2014); «Состояние и перспективы развития моделирования экосистем пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов» (СПб.: Нестор-История, 2013). По результатам международного сотрудничества с Германией, Францией и Швейцарией выполнены уникальные эксперименты по изучению внутренних волн в озерах мира и функционированию экосистемы озера подо льдом и опубликованы работы «Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study» (Inland Waters, 2019) и «Strongly nonlinear Internal waves in lakes: Generation, Transformation» (Springer, 2012). В результате сотрудничества с профессором МГУ К. Н. Показеевым и профессором СПб ЭМИ РАН

В. В. Меншуткиным написана «Физика и экология озер» в 2-х томах (М.: МГУ, 2003-2004).

В течение последних 20 лет Н. Н. Филатов был организатором и участником исследований многих озер мира, прибрежных зон Белого моря, Финского залива, а также Гавайских островов (2001–2005 гг., рук. академик В. Г. Бондур). Много лет он участвует в исследованиях по Программе Отделения наук о Земле РАН «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике» (рук. чл.-корр. РАН В. И. Данилов-Данильян и академик В. А. Румянцев). Своими теоретическими, экспериментальными работами Н. Н. Филатов внес существенный вклад в раскрытие закономерностей процессов функционирования экосистем водоемов, развития процессов эвтрофирования озер, а также эстуариев и прибрежных зон морей.

Более 25 лет Н. Н. Филатов руководил работой молодых специалистов, студентов и аспирантов по специальности «Геоэкология» и «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия», подготовил 12 кандидатов наук. После получения диплома по геоинформатике в Университете г. Уппсала (Швеция) в 1992 г. создал первые лаборатории ГИС в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН, на естественно-географическом факультете КГПА, организовал первые курсы по геоинформатике.

В 1996–2003 гг. Н. Н. Филатов являлся лауреатом государственной научной стипендии для ученых России. В 1998 г. ему присвоено звание профессора по кафедре географии. С 1993 по 2013 г. он профессор кафедры географии Карельского государственного педагогического университета, а с 2013 по 2015 г. – заведующий кафедрой географии, которая была создана в Петрозаводском государственном университете.

Н. Н. Филатов – автор и соавтор 607 научных работ, 4 индивидуальных монографий и 26 монографий и сборников, в которых он является редактором и соавтором, пять из них опубликованы в издательстве Springer-Praxis.

Николай Николаевич был членом ряда международных научных организаций: Международная ассоциация лимнологов (SIL), Северные исследовательские бассейны (NRB). Он член редколлегий и/или редсоветов научных журналов «Водные ресурсы», Москва; «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», С.-Петербург; «Экология. Экономика. Информатика», Ростов-на-Дону; «Проблемы Арктики и Антарктики», С.-Петербург; «Ученые записки РГГМУ», С.-Петербург; международного журнала «Geophysica», Финляндия (до 2022 г.).

С 2015 г. Н. Н. Филатов является основателем и ответственным редактором серии «Лимнология и океанология» журнала «Труды Карельского научного центра РАН».

Н. Н. Филатов – член диссертационных советов ММБИ КНЦ РАН, Мурманск (до 2024 г.); ФИЦ МГИ РАН, Севастополь; РГГМУ, С.-Петербург; член Совета образовательных программ по гидрометеорологии при СПбГУ; а также Объединенного ученого совета по наукам о Земле СПО РАН, ИВПС и КарНЦ РАН.

Необходимо отметить крупный вклад Н. Н. Филатова в развитие международного сотрудничества с Индией, Китаем, Финляндией, Швейцарией, Швецией, Норвегией, Канадой, США и другими странами по исследованию внутренних водоемов, водных ресурсов, прибрежной зоны морей, применению и разработке геоинформационных методов. Он инициатор и организатор серии международных конференций «Озера Евразии: проблемы и пути решения» (2017–2025 г.). С 2015 по 2023 г. Н. Н. Филатов – Президент Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена» (С.-Петербург).

С 2014 г. по настоящее время принимает активное участие в работе Законодательного собрания РК, Невско-Ладожского бассейнового Совета, где представлял результаты исследований Ладожского и Онежского озер для обоснования проекта федерального закона и приоритетного проекта рационального использования ресурсов и охраны экосистем озер. Материалы исследований использованы для подготовки документов, рекомендаций, обоснований для Федерального Собрания и Государственной Думы РФ, а также по запросу ОНЗ РАН (для Совета Безопасности РФ), касающегося рекомендаций по сохранению ресурсов Ладожского и Онежского озер, выполнению мероприятий, предусмотренных Комплексным планом реализации Стратегии национальной безопасности Российской Федерации,

по разделу «Проведение комплексных научных исследований состояния водоемов территории Российской Федерации». Отмечаем крупный вклад Николая Николаевича в развитие научных исследований и внедрение их в практику в Республике Карелия для обеспечения населения Севера РФ чистой водой, сохранения и рационального использования поверхностных и подземных вод, системных исследований Белого моря и водосбора, Ладожского и Онежского озер. Под его руководством и при его участии созданы атласы Республики Карелия (2021 и 2023 гг.), Белого моря и водосбора, Онежского озера, справочник «Озера Карелии», каталоги и информационные системы водных объектов. Под руководством Н. Н. Филатова совместно с коллегами из ИО, ИВМ, ИВП, ИНОЗ РАН по грантам РНФ и РФФИ выполнены исследования, опубликована монография «Диагноз и прогноз великих озер России» (2020 г.) и разработана Информационно-аналитическая система «Онежское озеро – водосбор» (2024 г.).

Николай Николаевич Филатов удостоен государственной награды – Почетной грамоты Президента Российской Федерации за заслуги в развитии отечественной науки, многолетнюю плодотворную работу и в связи с 300-летием со дня основания Российской академии наук (Распоряжение Президента Российской Федерации № 32-рп от 5 февраля 2024 г.). Имеет почетные звания «Заслуженный деятель науки РФ» (Указ Президента РФ от 20.06.2006), «Заслуженный деятель науки Карелии» (Постановление Председателя Правительства РК от 18.10.2001 № 234), «Отличник геодезии и картографии» (2000 г.), «Почетный работник науки и высоких технологий» (2021 г.), награжден юбилейной медалью «300 лет Российской академии наук» (2024 г.), медалью М. В. Ломоносова «За вклад в науку и экологию» (2019 г.) и Золотой медалью РГО им. Ф. П. Литке за исследования влияния изменений климата на крупные озера и моря Севера Евразии (2020 г.).

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:

У Д К 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 вклейках (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 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм ² Chloroplast cross-sectional area, μm ²	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм ² Mitochondria cross-sectional area, μm ²	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм ² Peroxisome cross-sectional area, μm ²	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from 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).

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

Yu. V. Manilyuk, V. V. Fomin. A STUDY OF THE CORIOLIS FORCE EFFECT ON SEICHE OSCILLATIONS IN THE SEA OF AZOV HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS	5
--	---

S. A. Kondratyev, S. D. Golosov, I. S. Zverev, A. M. Rasulova. RETROSPECTIVE AND PROGNOSTIC ASSESSMENT OF ABIOTIC CHARACTERISTICS OF UNSTUDIED LAKES IN THE PERMAFROST ZONE OF THE ASIAN PART OF RUSSIA USING MATHEMATICAL MODELING	19
---	----

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

M. A. Postevaya, V. A. Dauvalter, Z. I. Slukovskii. FORMATION PATTERNS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE WATER IN AN URBANIZED ENVIRONMENT IN THE ARCTIC (MURMANSK LAKES CASE STUDY)	33
--	----

K. V. Titova, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva. SULFATE REDUCTION IN WATER AND SEDIMENTS OF LAKE BELOYE (ARKHANGELSK REGION)	51
---	----

M. S. Potakhin, N. A. Belkina, M. S. Bogdanova, N. A. Myasnikova, I. V. Morozova, E. V. Gatal'skaya, A. V. Orlov, A. V. Pronina. SPECIFIC FEATURES OF ORGANIC MATTER ACCUMULATION IN BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE CHUDESNAYA LAMBA (KIVACH NATURE RESERVE)	62
--	----

A. G. Sharifullin, A. V. Gusarov, D. V. Ivanov. HEAVY METALS DISTRIBUTION PATTERNS IN BOTTOM SEDIMENTS OF BEAVER PONDS IN SMALL RIVERS IN THE NORTH OF THE VOLGA UPLAND, EUROPEAN RUSSIA	74
--	----

HYDROBIOLOGY

G. T. Frumin, S. G. Mikhlap. ASSESSMENT OF CHANGES IN THE DIVERSITY OF THE FISH POPULATION OF LAKE PSKOV	91
--	----

RESEARCH METHODS

E. V. Tekanova, R. E. Zdorovenov, M. B. Zobkov, A. V. Tolstikov, D. S. Konovalov. AN APPROACH TO QUANTIFYING THE CONTRIBUTION OF AQUATIC MOSSES (<i>WARNSTORFIA FLUITANS</i>) TO THE CARBON BALANCE IN WATER BODIES	101
---	-----

E. A. Morozov, H. Ye, D. Tang, D. V. Pozdnyakov, Y. Liu. SATELLITE DATA ANALYSIS OF THE PHYTOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE VARIATIONS ON DIFFERENT TIME SCALES IN THE SOUTH CHINA SEA	111
--	-----

HISTORY OF SCIENCE

L. E. Nazarova, T. I. Regerand. SCIENTIFIC EDUCATION CENTER "WATER BODIES OF KARELIA AND METHODS OF THEIR RESEARCH"	126
---	-----

DATES AND ANNIVERSARIES

Nikolai N. Filatov (on the 80th anniversary)	145
--	-----

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	149
------------------------------------	-----

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 2, 2025

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 8 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 24.03.2025. Дата выхода 31.03.2025. Формат 60x84¹/₈.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 18,3. Усл. печ. л. 18,1.
Тираж 100 экз. Заказ 844. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185030, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50