

Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр Российской академии наук»

# **ТРУДЫ**

## **КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

№ 6, 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. 6, 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 Experimental «Limnology and Oceanology» Series

N. L. BOLOTOVA, DSc (Biol.), Prof.; A. P. FEDOTOV, DSc (Geol.-Miner.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.), Prof.; N. E. GALAKHINA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Chem.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); N. V. 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](mailto: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 574.51

## НЕКОТОРЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ СОЛЕННЫХ ОЗЕР

А. Н. Егоров<sup>1\*</sup>, Д. Д. Яскеляйнен<sup>2</sup>, Е. С. Задереев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт озераведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), \*alex6-1@mail.ru

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет (пр. Свободный, 79, Красноярск, Красноярский край, Россия, 660041)

<sup>3</sup> Институт биофизики СО РАН, ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН» (Академгородок, 50/50, Красноярск, Красноярский край, Россия, 660036)

Представлены некоторые вопросы современного состояния и проблемы изучения соленых озер, которые широко распространены на Земле и при этом менее изучены, чем пресные водоемы. На основе анализа материалов Международного общества по исследованию соленых озер выявлены глобальные тенденции в изучении этих экосистем: рост публикационной активности исследователей из Китая и России при сохранении лидерства США и Австралии, а также преобладание описательных и региональных исследований. Определены ключевые современные исследовательские тренды: переход от концепции критической солености к изучению функциональной перестройки озерных экосистем, анализ каскадных эффектов при изменении солености, исследование альтернативных устойчивых состояний. Выделены перспективные направления, включая изучение влияния ионного состава, биогеохимии углерода, оценку экосистемных услуг и разработку прогнозных моделей. Особое внимание уделено ресурсному потенциалу соленых озер (минеральному, биологическому, бальнеологическому) и методологическим вызовам, связанным с проблемой вторичного засоления пресных вод. Подчеркнута необходимость междисциплинарного подхода для устойчивого управления этими уникальными экосистемами в условиях антропогенных изменений.

Ключевые слова: соленые озера; исследовательские тренды; критическая соленость; трофическая сеть; альтернативные состояния

Для цитирования: Егоров А. Н., Яскеляйнен Д. Д., Задереев Е. С. Некоторые современные проблемы изучения соленых озер // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 5–16. doi: 10.17076/lim1946

Финансирование. Исследования Е. С. Задереева выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0024).

# A. N. Egorov<sup>1\*</sup>, D. D. Yaskelyaynen<sup>2</sup>, E. S. Zadereev<sup>2,3</sup>. CURRENT CHALLENGES IN THE STUDY OF SALT LAKES

<sup>1</sup> *Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), \*alex6-1@mail.ru*

<sup>2</sup> *Siberian Federal University (79 Svobodnyi Ave., 660041 Krasnoyarsk, Russia)*

<sup>3</sup> *Institute of Biophysics, Krasnoyarsk Research Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (50/50 Akademgorodok, 660036 Krasnoyarsk, Russia)*

This paper addresses current issues and challenges in the study of saline lakes, which are widespread globally yet remain less studied than freshwater bodies. Based on an analysis of materials from the International Society for Salt Lake Research, global trends in the study of these ecosystems were identified: growing publication activity from researchers in China and Russia while the United States and Australia retain leadership, along with a predominance of descriptive and regional studies. Key latest research trends were determined: a shift from the concept of critical salinity towards studying functional ecosystem restructuring, analysis of cascade effects under changing salinity, and investigation of alternative stable states. Promising research directions are outlined, including the study of ion composition influence, carbon biogeochemistry, assessment of ecosystem services, and development of predictive models. Particular attention is given to the resource potential of saline lakes (mineral, biological, balneotherapeutic) and the methodological challenges associated with freshwater salinization issues. The necessity of an interdisciplinary approach for sustainable management of these unique ecosystems under anthropogenic changes is emphasized.

**Keywords:** saline lakes; research trends; critical salinity; food web; alternative states

**For citation:** Egorov A. N., Yaskelyaynen D. D., Zadereev E. S. Current challenges in the study of salt lakes. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 5–16. doi: 10.17076/lim1946

**Funding.** Studies by E. Zadereev were carried out under state assignment from the Ministry of Science and Higher Education Russia (project #FWES-2024-0024).

## Введение

Континентальные соленые озера, располагающиеся преимущественно в бессточных бассейнах аридных и семиаридных зон, являются широко распространенным глобальным явлением [Williams, 1996]. К числу наиболее крупных и изученных подобных природных объектов относятся Каспийское и Аральское моря, Мертвое море, озера Эльтон, Баскунчак, Иссык-Куль в Евразии; Большое Соленое озеро и озеро Моно в Северной Америке; озеро Мар-Чикита в Южной Америке; озеро Туркана в Африке; озеро Эри в Австралии. На долю соленых озер приходится до 45 % объема вод континентальных водоемов мира [Messenger et al., 2016]. В России они образуют обширные скопления в пределах евразийского степного пояса, простирающегося от Предкавказья до Забайкалья [Zadereev et al., 2020]. Важнейшей особенностью этих водоемов являются значительные многолетние и сезонные флуктуации уровня воды и солености, обусловленные их высокой чувствительностью к изменениям гидрологического режима и климатическим колебаниям [Wurtsbaugh et al., 2017].

Соленость озерных вод варьирует в широких пределах – от менее 0,1 до свыше 500 г/л [Williams, 1998]. Согласно одной из распространенных классификаций [Zheng, 1997], по общей солености озера подразделяются на пресные (< 1 г/л), солоноватоводные (1–35 г/л), соленые (> 35 г/л) и гиперсоленые (> 50 г/л). Принципиальное значение имеет разделение на талассные водоемы (с морской водой, имеющие связь с океаном, например лагуны) и аталассные (континентальные, расположенные в замкнутых бессточных бассейнах) [Oren, 2006]. Последние дополнительно классифицируются по степени солености, ионному составу (содовые, сульфатные, хлоридные), гидрологическому режиму (постоянные, временные) и генезису (тектонические, карстовые и др.) [Comin, Williams, 1994; Zadereev, 2018]. Существующие системы классификации отличаются сложностью и отсутствием единого подхода. В новой глобальной типологии экосистем Международного союза охраны природы (МСОП) (<https://global-ecosystems.org/>) континентальные соленые водоемы (соленость > 1 г/л) отнесены к типам «Постоянные соленые и содовые озера» (F2.6) и «Эфемерные соленые озера» (F2.7), а прибрежные – к «Периодически

закрытым и открытым озерам и лагунам» (FM1.3) [Keith et al., 2022]. В данной статье под солеными озерами понимаются континентальные водоемы с соленостью выше 1 г/л, расположенные в бессточных бассейнах [Coming, Williams, 1994; Егоров, Космаков, 2010; Zadereev, 2018].

### Анализ исследовательских трендов на основе результатов работы Международного общества по исследованию соленых озер

Созданное в 2001 году Международное общество по исследованию соленых озер (International Society for Salt Lake Research, <http://isslr.org/>) объединяет несколько сотен ученых и практиков, заинтересованных в изучении, использовании и охране соленых озер. Несмотря на то что общество было создано в 2001 году, международные номерные конференции по соленым озерам проходят каждые три года. Всего с 1979 года по настоящее время состоялось пятнадцать таких конференций (2024 г. Турция, 2021 г. Испания (онлайн), 2017 г. Россия, 2014 г. Китай, 2011 г. Аргентина, 2008 г. США,

2005 г. Австралия, 2002 г. Россия, 1999 г. США, 1994 г. Китай, 1991 г. Боливия, 1988 г. Испания, 1985 г. Кения, 1982 г. Канада, 1979 г. Австралия). Подробная информация о проведенных конференциях и ссылки на опубликованные специальные выпуски рецензируемых журналов с избранными статьями, в которых представлены результаты исследований соленых озер, доступны на сайте общества (<http://isslr.org/conferences/>). Безусловно, эти научные мероприятия объединяют не всех мировых исследователей, ведущих работы на соленых озерах. Однако можно предположить, что представляемые на конференциях сведения формируют понимание мировой научной активности в этой области исследований.

Анализ динамики аффилиаций по странам среди авторов статей в специальных выпусках журналов по итогам этих конференций (рис. 1) показал, что более 90 % аффилиаций в 271 опубликованной в спецвыпусках статье принадлежат 10 странам: США – 29 %, Австралия – 19 %, Россия – 13 %, Китай – 9 %, Канада – 7 %, Мексика – 4 %, Испания – 4 %, Израиль – 4 %, Германия – 1 %, Индия – 1 %. Причем на долю

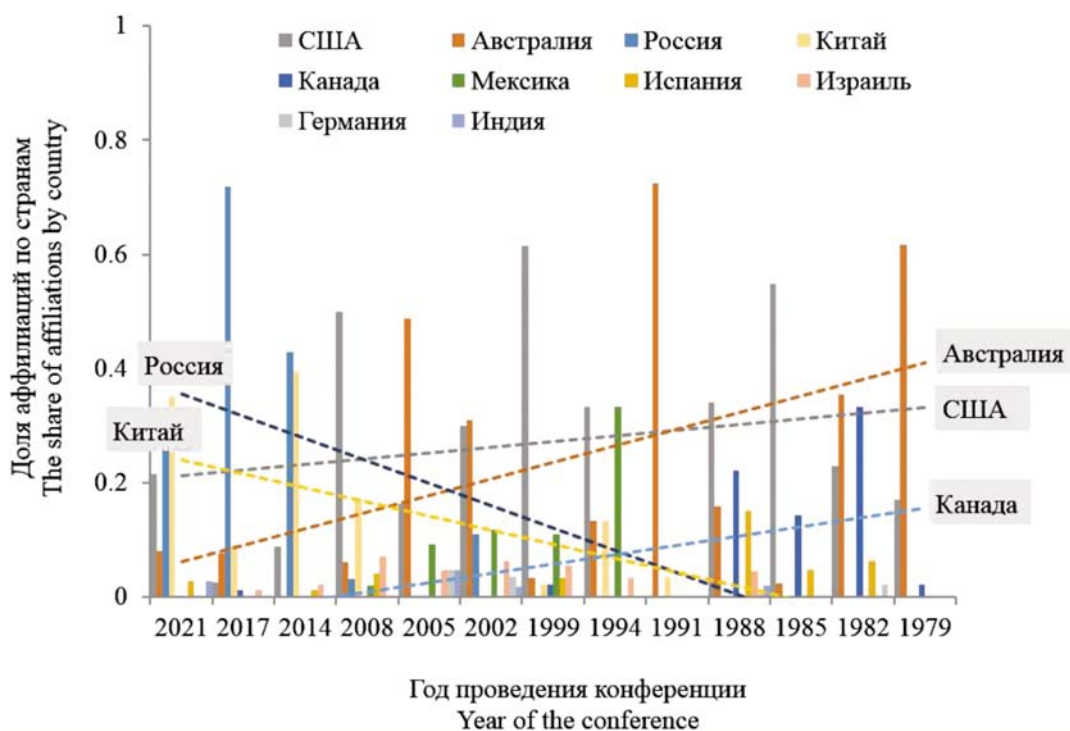


Рис. 1. Динамика доли аффилиаций по странам (10 наиболее часто встречающихся стран) авторов статей в специальных выпусках журналов по итогам международных конференций по исследованию соленых озер. Линейные тренды приведены для первых пяти стран (США, Австралия, Россия, Китай, Канада)

Fig. 1. Dynamics of the share of affiliations by country (10 most frequent countries) of authors of papers in special issues following the International Conferences on Salt Lake Research. Linear trends are given for the five most frequent countries (USA, Australia, Russia, China, and Canada)

первых пяти стран приходится практически 78 % всех аффилиаций. Временная динамика доли аффилиаций по странам авторов статей в спецвыпусках этих конференций демонстрирует смену лидеров. В первые годы доминировали исследователи из США, Австралии (стоит отметить, что идеологом и основателем общества можно считать известного австралийского лимнолога Билла Вильямса (Bill Williams, <http://isslr.org/about/bill-williams-award/>)) и Канады (до 90 % аффилиаций в отдельные годы). В последнее время (2014–2021 гг.) на ведущие роли по количеству аффилиаций в спецвыпусках журналов вышли исследователи из Китая и России. Период с 1994 по 2008 г. характеризовался наибольшим разнообразием, когда на прочие страны приходилось около 50 % аффилиаций. Как отмечено выше, спецвыпуски данной конференции не являются точным отражением текущего распределения научной активности в мире по исследованию соленых озер. Однако они характеризуют показательный тренд, в частности, увеличение роли научного сектора Китая, который достаточно универсален и для других областей науки [Xie et al., 2014].

Контент-анализ заголовков статей в этих спецвыпусках (табл.) показал, что в заголовках 271 опубликованной статьи используется 1106 уникальных слов. Среднее количество уникальных слов на один заголовок со временем увеличивается (с 4 слов в статьях, опубликованных в 1979–1988 годах, до почти 6 слов в статьях 2008–2021 годов), что может свидетельствовать об усложнении исследований. Все уникальные слова в заголовках статей относятся к 4 категориям: «озеро», «соленость», «география», «экология». Частотность использования слов из разных категорий практически не меняется со временем: чаще всего в заголовках используются «географические», характеризующие местоположение исследуемого объекта (озера) слова. Доминирование слов, напрямую связанных с описанием озера, говорит о том, что чаще всего публикуемые в этих спецвыпусках статьи носят описательный, фаунистический или региональный характер.

### **Основные тенденции и перспективные направления исследований соленых озер**

Соленость воды и видовое разнообразие гидробионтов в соленых озерах тесно взаимосвязаны, и в целом разнообразие уменьшается с ростом солености [Williams et al., 1990]. Однако эта зависимость нелинейна и опосредована как комплексом стрессоров, связанных с соленостью (экстремальными температурами,

гипоксией, высокой инсоляцией и резкой изменчивостью гидрологического режима [Ануфриева, Шадрин, 2023]), так и с действием факторов, в равной степени важных для функционирования и пресноводных экосистем (биогенная нагрузка, особенности температурной стратификации, географические особенности).

Исторически для описания реакции водных организмов на соленость оперировали понятием критической солености, обоснованным В. В. Хлебовичем на определенных таксономических группах [Хлебович, 1974, 2015]. Однако современные работы, в том числе российских исследователей, выявляют серьезные исключения из этих обобщений [Telesh et al., 2013; Скарлато, Телеш, 2017]. Более того, активно дискутируется важный вклад стохастичности в формирование альтернативных устойчивых состояний экосистем соленых озер, что делает их отклик на изменение солености сложно предсказуемым [Shadrin, 2018]. Таким образом, акцент смещается с поиска универсальных критических соленостей, ориентированных на биоразнообразие, на изучение общих закономерностей функциональной и структурной перестройки всей экосистемы, включая потоки вещества и энергии в трофических сетях. Это предполагает количественную оценку изменения продуктивности, эффективности передачи энергии и метаболизма системы.

Поскольку уровень воды в бессточных озерах определяется балансом притока (поверхностного и подземного стока) и испарения, изменение интенсивности этих процессов (например, сокращение стока из-за засухи или забора воды на другие нужды в пределах водосборного бассейна или увеличение испарения из-за роста температуры) способно приводить к значительным колебаниям уровня воды и, как следствие, к резким скачкам солености. Это сказывается на видовом составе и обилии биоты, поскольку большинство видов адаптировано к определенному диапазону солености [например, Aladin, 1991]. Так, детальное изучение последствий усыхания Аральского моря позволило проследить конкретные этапы трансформации: исчезновение пресноводной и морской фауны, доминирование эвригаллиных видов (рачки *Moina*, *Halicyclops*, личинки хирономид), а при солености выше 60–80 г/л – крайнее обеднение биоценоза с доминированием бактерий, одноклеточных водорослей и рачка *Artemia* [Aladin et al., 2019].

Качественный скачок в понимании механизмов функционирования соленых озер связан со сравнительными исследованиями озерных систем-градиентов, в частности в степных

Списки, количество (N) и частота использования уникальных слов по категориям (C) («озеро» (l), «соленость» (s), «география» (g), «экология» (e)) в заголовках статей в специальных выпусках журналов международных конференций по исследованию соленых озер

Lists, total use (N) and frequency of the use of unique words by category (C) (*lake* (l), *salinity* (s), *geography* (g), *ecology* (e)) in the titles of papers in special issues of International Conferences on Salt Lake Research

| 1979–2021                    |     |   | 2008–2021                    |    |   | 1991–2005                    |    |   | 1979–1988                    |    |   |
|------------------------------|-----|---|------------------------------|----|---|------------------------------|----|---|------------------------------|----|---|
| Список слов<br>List of words | N   | C | Список слов<br>List of words | N  | C | Список слов<br>List of words | N  | C | Список слов<br>List of words | N  | C |
| Lake                         | 116 | l | Lake                         | 44 | l | Lake                         | 28 | l | Lake                         | 44 | l |
| Lakes                        | 76  | l | Salt                         | 31 | s | Salt                         | 20 | s | Lakes                        | 36 | l |
| Salt                         | 66  | s | Lakes                        | 26 | l | Australia                    | 15 | g | Saline                       | 33 | s |
| Saline                       | 62  | s | Saline                       | 18 | s | California                   | 14 | g | Salt                         | 15 | s |
| Salinity                     | 27  | s | Great                        | 12 | g | Lakes                        | 14 | l | Australia                    | 9  | g |
| Australia                    | 25  | g | Microbial                    | 9  | e | Salinity                     | 13 | s | Salinity                     | 9  | s |
| Sea                          | 23  | l | USA                          | 9  | g | Sea                          | 12 | g | Western                      | 7  | g |
| California                   | 22  | g | Diversity                    | 8  | e | Saline                       | 11 | s | Distribution                 | 7  | e |
| Hypersaline                  | 21  | s | Water                        | 8  | l | Salton                       | 10 | g | Chemistry                    | 7  | e |
| Western                      | 19  | g | Sea                          | 8  | g | Hypersaline                  | 9  | s | California                   | 6  | g |
| Microbial                    | 17  | e | Utah                         | 8  | g | Western                      | 7  | g | Nevada                       | 6  | g |
| Water                        | 17  | l | Hypersaline                  | 7  | s | Water                        | 7  | l | Mono                         | 6  | g |
| Great                        | 17  | g | China                        | 6  | g | Inland                       | 6  | g | Benthic                      | 6  | e |
| Communities                  | 15  | e | Russia                       | 5  | g | Zooplankton                  | 5  | e | Australian                   | 6  | g |
| Distribution                 | 14  | e | Brine                        | 5  | s | Study                        | 5  | e | Ecology                      | 5  | e |
| USA                          | 13  | g | Salinity                     | 5  | s | Fish                         | 5  | e | Meromictic                   | 5  | l |
| Waters                       | 12  | l | Communities                  | 5  | e | Microbial                    | 5  | e | Pyramid                      | 5  | g |
| Brine                        | 12  | s | Western                      | 5  | g | Communities                  | 5  | e | Abundance                    | 5  | e |
| Inland                       | 11  | g |                              |    |   | South                        | 5  | g | Waters                       | 5  | l |
| Utah                         | 11  | g |                              |    |   |                              |    |   | Hypersaline                  | 5  | s |
| Chemistry                    | 11  | e |                              |    |   |                              |    |   | South                        | 5  | g |
| Diversity                    | 11  | e |                              |    |   |                              |    |   | Brine                        | 5  | s |
| South                        | 11  | g |                              |    |   |                              |    |   | communities                  | 5  | e |
| Study                        | 10  | e |                              |    |   |                              |    |   |                              |    |   |
| Mono                         | 10  | g |                              |    |   |                              |    |   |                              |    |   |
| Production                   | 10  | e |                              |    |   |                              |    |   |                              |    |   |
| Meromictic                   | 10  | l |                              |    |   |                              |    |   |                              |    |   |
| Salton                       | 10  | g |                              |    |   |                              |    |   |                              |    |   |
| dynamics                     | 10  | e |                              |    |   |                              |    |   |                              |    |   |

Частота (%) использования уникальных слов по категориям (l/s/g/e)  
The frequency (%) of the use of unique words of different categories l/s/g/e)

|                                                                        |     |     |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|
| 28 (e)                                                                 | 17  | 26  | 26  |
| 34 (g)                                                                 | 39  | 27  | 37  |
| 17 (s)                                                                 | 28  | 21  | 22  |
| 21 (l)                                                                 | 17  | 16  | 17  |
| Всего заголовков статей<br>Total number of paper titles                |     |     |     |
| 271                                                                    | 100 | 76  | 95  |
| Число уникальных слов на заголовки<br>Number of unique words per title |     |     |     |
| 4,1                                                                    | 5,9 | 5,7 | 4,0 |

озерах Забайкалья, Северной Америки, юга Сибири, Крыма, на Тибете и в Средней Азии [Cooper, Wissel, 2012; Lin et al., 2017; Golubkov et al., 2018; Afonina, Tashlykova, 2020; Zsuga et al., 2021; Zadereev et al., 2022a]. В целом изменение солёности вызывает каскадные перестройки в трофической сети. При превышении пределов устойчивости происходит замещение чувствительных видов (например, многих рыб и ветвистоусых ракообразных) более эвригалльными формами (веслоногие ракообразные, личинки насекомых, беспозвоночные хищники). Это напрямую влияет на характер трофических связей: смена доминантов-фильтраторов (с неселективных Cladocera на селективных Copepoda) меняет давление выедания на фитопланктон [Ger et al., 2019], а исчезновение рыбы и замещение ее беспозвоночными хищниками может усиливать каскадные эффекты, нисходящим путем регулируя численность нижестоящих трофических уровней [Shadrin et al., 2021]. В результате структурная перестройка сообщества приводит к изменению эффективности переноса вещества и энергии в экосистеме, часто влияя на общую продуктивность [Golubkov et al., 2018; Moffett et al., 2020].

В отличие от пресноводной лимнологии, где разработаны концептуальные (например, PEG-модель сезонной сукцессии планктона [Sommer et al., 1986], авторы которой сами в качестве ее недостатков отмечают излишний универсализм и неспособность адекватно предсказать поведение конкретной экосистемы [Sommer et al., 2012]) и обладающие большей предсказательной силой математические [Меншуткин, 2010; Mooij et al., 2010] модели, для солёных озёр аналогичные обобщения только начинают формироваться (рис. 2). При этом предложенные концептуальные схемы трансформации трофической сети с ростом солёности пока остаются неполными. В частности, слабо изучено, как под действием солёности модифицируется сила каскадных эффектов. На их выраженность, с одной стороны, влияет изменение видового состава зоопланктона, а с другой – исчезновение рыб и их замещение беспозвоночными хищниками, причем оба процесса носят пороговый характер. Также активно дискутируется концепция альтернативных устойчивых состояний. Если для пресных озёр альтернативные устойчивые состояния определяются дихотомией «прозрачная вода с доминированием макрофитов» / «мутная вода с доминированием фитопланктона» [Janssen et al., 2014], то в солёных озёрах их спектр шире и включает состояния с доминированием микробных

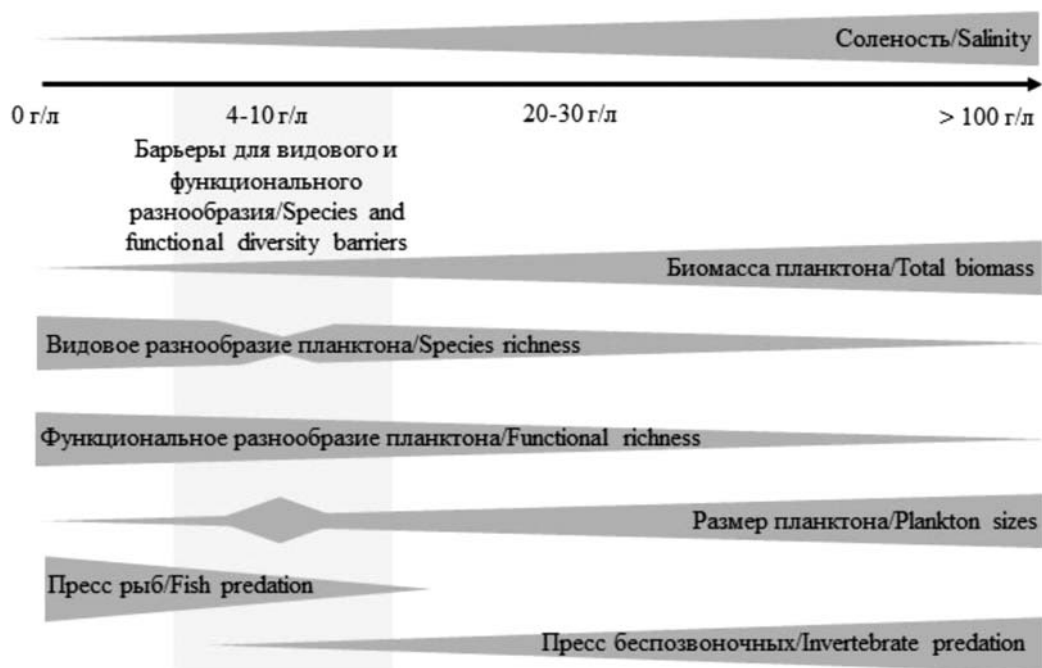
петель или макробеспозвоночных, полное понимание которых еще не достигнуто.

К числу перспективных направлений относится изучение эффектов солёности на функциональные характеристики организмов, такие как скорости и селективность питания зоопланктона [Zadereev et al., 2022b], что напрямую сказывается на размерной структуре фитопланктона, которая также зависит от плотности и вязкости воды, изменяющихся с солёностью [Zohary et al., 2017; Naselli-Flores et al., 2021]. Отдельной темой является изучение влияния не просто солёности, моделируемой NaCl, а специфического ионного состава [Cunillera-Montcusí et al., 2022], где натурные исследования на близкорасположенных озёрах с различным ионным составом и концентрацией растворённых солей (например, содовые озёра Забайкалья, сульфатно-магниевого озёра юга Сибири и другие) являются перспективным объектом для получения новых знаний.

Существенный пробел присутствует в понимании роли химического состава и pH, связанного с карбонатной системой, в биогеохимическом цикле углерода. Это требует изучения взаимодействия геохимии и живого вещества для получения количественной оценки роли этих процессов. Ярким примером является противоречие в оценках роли озёр как источников или стоков углекислого газа: тогда как расчетные методы указывают на удвоение эмиссии CO<sub>2</sub> из солёных озёр по сравнению с пресными [Duarte et al., 2008], натурные измерения фиксируют и их способность к значительной секвестрации углерода [Li et al., 2022].

Важным прикладным аспектом является оценка экосистемных услуг солёных озёр. За последние годы выполнены оценки количества и относительной важности экосистемных услуг, предоставляемых пресными озёрами [Reynaud, Lanzanova, 2017; Steinman et al., 2017; Sterner et al., 2020]. В отличие от пресных озёр солёные озёра предоставляют иной набор услуг: они критически важны как места остановок мигрирующих птиц, используются для добычи различных солей, все активнее вовлекаются в аквакультуру, являются основой для курортов и туризма [Saccò et al., 2021]. Таким образом, для них характерен отличный от пресных озёр набор услуг, количественная оценка зависимости которого от солёности и экологического состояния практически не проводилась, хотя именно она может стать мостиком к управлению этими водоемами.

Помимо сравнительного подхода (изучение цепочек озёр) в последние годы широко используется мезокосменный подход, позволяющий в контролируемых условиях манипулировать



#### Важные модифицирующие факторы:

Глубина (голомиктные vs. стратифицированные озера)  
 Биогенная нагрузка (олиготрофные vs. эвтрофные озера)  
 Ионный состав (содовые, сульфатные, хлоридные озера)  
 Географические факторы (например, высокогорные озера, озера в разных климатических зонах)

#### Important modifying factors:

Depth (polymictic vs. stratified lakes)  
 Nutrient load (oligotrophic vs. eutrophic lakes)  
 Ionic composition (soda, sulfate, chloride lakes)  
 Geographical factors (e.g., high-altitude lakes, lakes in different climatic zones)

Рис. 2. Концептуальная схема реакции озерного планктона и трофической сети на увеличение солености. Схема составлена на основе концептуальных схем, представленных в работах [Cooper, Wissel, 2012; Lin et al., 2017; Gutierrez et al., 2018; Afonina, Tashlykova, 2020, 2024; Zadereev et al., 2020]

Fig. 2. Conceptual scheme of the response of lake plankton and food web to increasing salinity. The scheme is based on the conceptual frameworks presented in [Cooper, Wissel, 2012; Lin et al., 2017; Gutierrez et al., 2018; Afonina, Tashlykova, 2020, 2024; Zadereev et al., 2020]

соленостью [Hébert et al., 2023]. Стимулом для его развития стал интерес к проблеме вторичного засоления пресных вод из-за хозяйственной деятельности и изменения климата [Cunillera-Montcusí et al., 2022]. Однако прогноз последствий засоления для пресных водоемов затруднен, так как уровни солености, при которых наблюдаются изменения, часто ниже тех, что традиционно изучаются в соленых озерах. Кроме того, поведение системы в мезокосмах объемом в несколько кубометров фундаментально отличается от озерной из-за гидродинамических ограничений.

Соленые озера являются и уникальными объектами для палеоолиминологических реконструкций вследствие мощной и выраженной стратификации донных отложений, фиксирующих климатические изменения [Last, Ginn, 2005]. Два важных направления остаются за рамками данного анализа, но заслуживают упоминания: исследования уникальных экстремофильных микроорганизмов, имеющие значение для биотехнологий и астробиологии [Oren, 2014], и разработка высокотехнологичных методов промышленного извлечения ценных элементов (литий, уран) из рассолов [Kong et al., 2017].

Таким образом, современные исследования соленых озер переходят от этапа описания к прогностическому. Достижение этой цели требует комплексного подхода, объединяющего гидрологию, биологию и геохимию для количественной оценки функциональных характеристик экосистем и их услуг, что позволит не только расширить фундаментальные знания, но и решить прикладные задачи устойчивого управления этими уникальными водоемами.

## Заключение

Соленые озера представляют собой не только уникальные природные объекты, но и критически важные ресурсные системы. Особенности физико-химической и биологической структуры этих водоемов, высокая динамика их эволюции формируют природные ресурсы, потенциал которых чрезвычайно высок и обладает широким спектром: минеральные ресурсы включают различные соли, цеолиты, уран, литий, бром, йод; биологические ресурсы представлены культивацией и добычей ценных водорослей (*Spirulina*, *Dunaliella*) и важнейшей кормовой аквакультуры (представители рода *Artemia*); бальнеологические ресурсы включают целебные грязи; рекреационные ресурсы имеют растущий потенциал. Недостаточная изученность закономерностей формирования взаимообусловленных природных и антропогенных процессов в соленых озерах и их бассейнах, особенностей функционирования их экосистем и формирования природных ресурсов в различных географических зонах привела к значительному отставанию в изученности геоэкологии и природопользования соленых озер по сравнению с масштабами и результатами исследований этих проблем для пресных вод. Набирающая остроту проблема засоления пресных вод в определенной степени стирает существовавшее до последнего времени разделение между исследованиями пресных и соленых водоемов. С одной стороны, соленость может рассматриваться как непрерывная переменная и перед исследователями стоит задача понимания физических, химических, биологических и экологических трансформаций, наблюдаемых в озерах вдоль непрерывного градиента солености. С другой стороны, исследователями выделяются различные пороговые значения солености, связанные как с консервативными механизмами осморегуляции у обитателей водных экосистем, так и с физико-химическими свойствами воды (плотность, вязкость, теплоемкость, растворимость газов в воде, температура замерзания и другие), зависящими от солености. Поиск таких критических значений солености,

понимание роли стохастических процессов и возможностей существования альтернативных состояний у экосистем соленых озер, установление связей между гидрохимическими, гидрофизическими и экологическими характеристиками в градиенте солености и их влияния на социально-экономический и ресурсный потенциал соленых озер составляют актуальную задачу исследователей на ближайшие годы. Решение этих фундаментальных и прикладных задач требует консолидации усилий исследователей разных профилей и является залогом устойчивого управления этими уязвимыми и ценными экосистемами в условиях меняющегося климата и растущего антропогенного давления.

## Литература

- Ануфриева Е., Шадрин Н. Жизнь в экстремальной среде. Животные в экосистемах гиперсоленых вод. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2023. 185 с.
- Егоров А. Н., Космаков И. В. География и природопользование соленых озер / Отв. ред. Д. А. Бураков, В. С. Кусковский. Новосибирск: Наука, 2010. 179 с.
- Меншуткин В. В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск-СПб.: КарНЦ РАН, 2010. 416 с.
- Скарлато С. О., Телеш И. В. Развитие концепции максимального разнообразия протистов в зоне критической солености воды // Биология моря. 2017. Т. 43, № 1. Р. 3–14.
- Хлебович В. В. Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука, 1974. 236 с.
- Хлебович В. В. Критическая соленость как маркер смены калиевой эпохи развития жизни на натриевую // Успехи современной биологии. 2015. Т. 135, № 1. С. 18–20.
- Afonina E. Y., Tashlykova N. A. Fluctuations in plankton community structure of endorheic soda lakes of southeastern Transbaikalia (Russia) // Hydrobiologia. 2020. Vol. 847, no. 6. P. 1383–1398. doi: 10.1007/s10750-020-04207-z
- Afonina E. Yu., Tashlykova N. A. Structural and functional diversity of plankton communities along lake salinity gradients // Aquat. Ecol. 2024. Vol. 58. P. 717–740. doi: 10.1007/s10452-024-10101-w
- Aladin N. V. Salinity tolerance and morphology of the osmoregulation organs in Cladocera with special reference to Cladocera from the Aral Sea // Hydrobiologia. 1991. Vol. 225, no. 1. P. 291–299. doi: 10.1007/BF00028407
- Aladin N. V., Gontar V. I., Zhakova L. V., Plotnikov I. S., Smurov A. O., Rzymiski P., Klimaszuk P. The zoocenosis of the Aral Sea: six decades of fast-paced change // Environ. Sci. Pollut. Res. 2019. Vol. 326, no. 3. P. 2228–2237. doi: 10.1007/s11356-018-3807-z
- Comin F., Williams W. D. Parched continents: our common future? // Ed. R. Margelef. Limnology Now: A Paradigm of Planetary Problems. Amsterdam: Elsevier, 1994. P. 473–527.

- Cooper R. N., Wissel B. Interactive effects of chemical and biological controls on food-web composition in saline prairie lakes // *Aquat. Biosyst.* 2012. Vol. 8. Art. 29. doi: 10.1186/2046-9063-8-29
- Cunillera-Montcusí D., Beklioğlu M., Cañedo-Argüelles M., Jeppesen E., Ptacnik R., Amorim C., Arnott S., Berger S., Brucet S., Dugan H., Gerhard M., Horváth Z., Langenheder S., Nejtgaard J., Reinikainen M., Striebel M., Urrutia-Cordero P., Vad C., Zadereev E., Matias M. Freshwater salinisation: a research agenda for a saltier world // *Trends Ecol. Evol.* 2022. Vol. 37, no. 5. P. 440–453. doi: 10.1016/j.tree.2021.12.005
- Duarte C. M., Prairie Y. T., Montes C., Cole J. J., Striegl R., Melack J., Downing J. A. CO<sub>2</sub> emissions from saline lakes: A global estimate of a surprisingly large flux // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2008. Vol. 113. G04041. doi: 10.1029/2007JG000637
- Ger K. A., Naus-Wiezer S., De Meester L., Lüring M. Zooplankton grazing selectivity regulates herbivory and dominance of toxic phytoplankton over multiple prey generations // *Limnol. Oceanogr.* 2019. Vol. 64. P. 1214–1227. doi: 10.1002/lno.11108
- Golubkov S. M., Shadrin N. V., Golubkov M. S., Balushkina E. V., Litvinchuk L. F. Food chains and their dynamics in ecosystems of shallow lakes with different water salinities // *Russian Journal of Ecology.* 2018. Vol. 49, no. 5. P. 442–448. doi: 10.1134/S1067413618050053
- Gutierrez M. F., Tavşanoğlu Ü. N., Vidal N., Yu J., Teixeira-de Mello F., Çakiroğlu A. I., He H., Liu Z., Jeppesen E. Salinity shapes zooplankton communities and functional diversity and has complex effects on size structure in lakes // *Hydrobiologia.* 2018. Vol. 813. P. 237–255. doi: 10.1007/s10750-018-3529-8
- Hébert M. P., Symons C. C., Cañedo-Argüelles M. et al. Lake salinization drives consistent losses of zooplankton abundance and diversity across coordinated mesocosm experiments // *Limnol. Oceanogr. Lett.* 2023. Vol. 8, no. 1. P. 19–29. doi: 10.1002/lol2.10239
- Janssen A. B., Teurlincx S., An S., Janse J. H., Paerl H. W., Mooij W. M. Alternative stable states in large shallow lakes? // *J. Great Lakes Res.* 2014. Vol. 40, no. 4. P. 813–826. doi: 10.1016/j.jglr.2014.09.019
- Keith D. A., Ferrer-Paris J. R., Nicholson E., Bishop M. J., Polidoro B. A., Ramirez-Llodra E., Tozer M. G., Nel J. L., Mac Nally R., Gregr E. J., Watermeyer K. E. A function-based typology for Earth's ecosystems // *Nature.* 2022. Vol. 610, no. 7932. P. 513–518. doi: 10.1038/s41586-022-05318-4
- Kong R., Xue F., Wang J., Zhai H., Zhao L. Research on mineral resources and environment of salt lakes in Qinghai Province based on system dynamics theory // *Resour. Policy.* 2017. Vol. 52. P. 19–28. doi: 10.1016/j.resourpol.2017.01.006
- Last W. M., Ginn F. M. Saline systems of the Great Plains of western Canada: an overview of the limnology and paleolimnology // *Saline Syst.* 2005. Vol. 1. P. 1–38. doi: 10.1186/1746-1448-1-10
- Li X. Y., Shi F. Z., Ma Y. J., Zhao S. J., Wei J. Q. Significant winter CO<sub>2</sub> uptake by saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau // *Glob. Change Biol.* 2022. Vol. 28, no. 6. P. 2041–2052. doi: 10.1111/gcb.16054
- Liu Q., Xu L., Liu Z., Jeppesen E., Han B. P. Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in Tibetan Lakes: Implication for the effect of climate warming // *Water Res.* 2017. Vol. 124. P. 618–629. doi: 10.1016/j.watres.2017.07.078
- Messenger M. L., 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, no. 1. P. 13603. doi: 10.1038/ncomms13603
- Moffett E. R., Baker H. K., Bonadonna C. C., Shurin J. B., Symons C. C. Cascading effects of freshwater salinization on plankton communities in the Sierra Nevada // *Limnol. Oceanogr. Lett.* 2020. Vol. 8(1). P. 30–37. doi: 10.1002/lol2.10177
- Mooij W. M., Trolle D., Jeppesen E., Arhonditsis G., Belolipetsky P. V., Chitamwebwa D. B., Degermendzhy A. G., De Angelis D. L., De Senerpont Domis L. N., Downing A. S., Elliott J. A. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches // *Aquat. Ecol.* 2010. Vol. 44, no. 3. P. 633–667. doi: 10.1007/s10452-010-9339-3
- Naselli-Flores L., Zohary T., Padisák J. Life in suspension and its impact on phytoplankton morphology: an homage to Colin S. Reynolds // *Hydrobiologia.* 2021. Vol. 848, no. 1. P. 7–30. doi: 10.1007/s10750-020-04217-x
- Oren A. Halophilic archaea on Earth and in space: growth and survival under extreme conditions // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2014. Vol. 372, no. 2030. Art. 20140194. doi: 10.1098/rsta.2014.0194
- Oren A. Life at high salt concentrations // *The Prokaryotes.* New York: Springer, 2006. P. 263–282.
- Reynaud A., Lazzanova D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes // *Ecol. Econ.* 2017. Vol. 137. P. 184–194. doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.03.001
- Saccò M., Whit N. E., Harrod C., Salazar G., Aguilar P., Cubillos C. F., Meredith K., Baxter B. K., Oren A., Anufrieva E., Shadrin N. Salt to conserve: A review on the ecology and preservation of hypersaline ecosystems // *Biol. Rev.* 2021. Vol. 96, no. 6. P. 2828–2850.
- Shadrin N. V. The alternative saline lake ecosystem states and adaptive environmental management // *J. Oceanol. Limnol.* 2018. Vol. 36, no. 6. P. 2010–2017. doi: 10.1007/s00343-018-7307-2
- Shadrin N., Yakovenko V., Anufrieva E. Can *Gammarus aequicauda* (Amphipoda) suppress a population of *Baeotendipes noctivagus* (Chironomidae) in a hypersaline lake? A case of Lake Moynaki (Crimea) // *Aquac. Res.* 2021. Vol. 52. P. 1705–1714. doi: 10.1111/are.15024
- Sommer U., Adrian R., De Senerpont Domis L., Elser J. J., Gaedke U., Ibelings B., Jeppesen E., Lüring M., Molinero J. C., Mooij W. M., Van Donk E. Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) model: Mechanisms driving plankton succession // *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 2012. Vol. 43. P. 429–448. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110411-160251
- Sommer U., Gliwicz Z. M., Lampert W., Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters // *Archiv für Hydrobiologie.* 1986. Vol. 106, no. 4. P. 433–471.
- Steinman A. D., Cardinale B. J., Munns Jr W. R., Ogdahl M. E., Allan J. D., Angadi T., Bartlett S.,

Brauman K., Byappanahalli M., Doss M., Dupont D. Ecosystem services in the Great Lakes // *J. Great Lakes Res.* 2017. Vol. 43, no. 3. P. 161–168. doi: 10.1016/j.jglr.2017.02.004

Sterner R. W., Keeler B., Polasky S., Poudel R., Rhude K., Rogers M. Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes // *Ecosyst. Serv.* 2020. No. 41. Art. 101046. doi: 10.1016/j.ecoser.2019.101046

Telesh I., Schubert H., Skarlato S. Life in the salinity gradient: discovering mechanisms behind a new biodiversity pattern // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2013. No. 135. P. 317–327. doi: 10.1016/j.ecss.2013.10.013

Williams W. D. Guidelines of lake management // *Management of inland saline waters.* 1998. Vol. 6, no. 108.

Williams W. D. What future for saline lakes? // *Environment: Science and Policy for Sustainable Development.* 1996. Vol. 38, no. 9. P. 12–39. doi: 10.1080/00139157.1996.9930999

Williams W. D., Boulton A. J., Taaffe R. G. Salinity as a determinant of salt lake fauna: a question of scale // *Hydrobiologia.* 1990. Vol. 197, no. 1. P. 257–266. doi: 10.1007/bf00026955

Wurtsbaugh W. A., Miller C., Null S. E., DeRose R. J., Wilcock P., Hahnenberger M., Howe F., Moore J. Decline of the world's saline lakes // *Nat. Geosci.* 2017. Vol. 10, no. 11. P. 816–821. doi: 10.1038/NGEO3052

Xie Y., Zhang C., Lai Q. China's rise as a major contributor to science and technology // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2014. Vol. 111, no. 26. P. 9437–9442. doi: 10.1073/pnas.1407709111

Zadereev E. Salt lakes, surrounding environments and environmental management / Eds. M. Zheng, T. Deng, A. Oren. Introduction to salt lake sciences. Beijing: Science Press, 2018. P. 172–179.

Zadereev E., Drobotov A., Anishchenko O., Kolmakova A., Lopatina T., Oskina N., Tolomeev A. The structuring effects of salinity and nutrient status on zooplankton communities and trophic structure in Siberian lakes // *Water.* 2022a. Vol. 14, no. 9. P. 1468. doi: 10.3390/w14091468

Zadereev E., Lipka O., Karimov B., Krylenko M., Elias V., Pinto I. S., Alizade V., Anker Y., Feest A., Kuznetsova D., Mader A. Overview of past, current, and future ecosystem and biodiversity trends of inland saline lakes of Europe and Central Asia // *Inland Waters.* 2020. Vol. 10, no. 4. P. 438–452. doi: 10.1080/20442041.2020.1772034

Zadereev E. S., Lopatina T. S., Ovchinnikov S. D., Oskina N. A., Drobotov A. V., Tolomeev A. P. The effect of salinity on the grazing rate and survival of *Daphnia magna* females adapted to different salinities // *Aquat. Ecol.* 2022b. Vol. 56. P. 639–652. doi: 10.1007/s10452-021-09941-7

Zheng M. P. Classification of saline lakes and types of mineral deposit // *An introduction to saline lakes on the Qinghai – Tibet Plateau.* New York: Springer, 1997. P. 79–84. doi: 10.1007/978-94-011-5458-1\_5

Zohary T., Fishbein T., Shlichter M., Naselli-Flores L. Larger cell or colony size in winter, smaller in summer – a pattern shared by many species of Lake Kinneret phytoplankton // *Inland Waters.* 2017. Vol. 7, no. 2. P. 200–209. doi: 10.1080/20442041.2017.1320505

Zsuga K., Inelova Z., Boros E. Zooplankton community structure in shallow saline steppe inland waters // *Water.* 2021. No. 13. Art. 1164. doi: 10.3390/w13091164

## References

Afonina E. Y., Tashlykova N. A. Fluctuations in plankton community structure of endorheic soda lakes of southeastern Transbaikalia (Russia). *Hydrobiologia.* 2020;847(6):1383–1398. doi: 10.1007/s10750-020-04207-z

Afonina E. Yu., Tashlykova N. A. Structural and functional diversity of plankton communities along lake salinity gradients. *Aquat. Ecol.* 2024;58:717–740. doi: 10.1007/s10452-024-10101-w

Aladin N. V. Salinity tolerance and morphology of the osmoregulation organs in Cladocera with special reference to Cladocera from the Aral Sea. *Hydrobiologia.* 1991;225(1):291–299. doi: 10.1007/BF00028407

Aladin N. V., Gontar V. I., Zhakova L. V., Plotnikov I. S., Smurov A. O., Rzymyski P., Klimaszuk P. The zoocenosis of the Aral Sea: six decades of fast-paced change. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019;326(3):2228–2237. doi: 10.1007/s11356-018-3807-z

Anufrieva E., Shadrin N. Life in extreme environments. Animals in hypersaline ecosystems. Moscow: KMK; 2023. 185 p. (In Russ.)

Comin F., Williams W. D. Parched continents: our common future? R. Margelef (ed.). *Limnology Now: A Paradigm of Planetary Problems.* Amsterdam: Elsevier; 1994. P. 473–527.

Cooper R. N., Wissel B. Interactive effects of chemical and biological controls on food-web composition in saline prairie lakes. *Aquat. Biosyst.* 2012;8:29. doi: 10.1186/2046-9063-8-29

Cunillera-Montcusí D., Beklioglu M., Cañedo-Argüelles M., Jeppesen E., Ptacnik R., Amorim C., Arnott S., Berger S., Brucet S., Dugan H., Gerhard M., Horváth Z., Langenheder S., Nejstgaard J., Reinikainen M., Striebel M., Urrutia-Cordero P., Vad C., Zadereev E., Matias M. Freshwater salinisation: a research agenda for a saltier world. *Trends Ecol. Evol.* 2022;37(5):440–453. doi: 10.1016/j.tree.2021.12.005

Duarte C. M., Prairie Y. T., Montes C., Cole J. J., Striegl R., Melack J., Downing J. A. CO<sub>2</sub> emissions from saline lakes: A global estimate of a surprisingly large flux. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2008;113:G04041. doi: 10.1029/2007JG000637

Egorov A. N., Kosmakov I. V. Geography and nature management of salt lakes. Novosibirsk: Nauka; 2010. 179 p. (In Russ.)

Ger K. A., Naus-Wiezer S., De Meester L., Lüring M. Zooplankton grazing selectivity regulates herbivory and dominance of toxic phytoplankton over multiple prey generations. *Limnol. Oceanogr.* 2019;64:1214–1227. doi: 10.1002/lno.11108

Golubkov S. M., Shadrin N. V., Golubkov M. S., Balushkina E. V., Litvinchuk L. F. Food chains and their dynamics in ecosystems of shallow lakes with different water salinities. *Russian Journal of Ecology.* 2018;49(5):442–448. doi: 10.1134/S1067413618050053

Gutierrez M. F., Tavşanoğlu Ü. N., Vidal N., Yu J., Teixeira-de Mello F., Çakiroğlu A. I., He H., Liu Z.,

- Jeppesen E. Salinity shapes zooplankton communities and functional diversity and has complex effects on size structure in lakes. *Hydrobiologia*. 2018;813:237–255. doi: 10.1007/s10750-018-3529-8
- Hébert M. P., Symons C. C., Cañedo-Argüelles M. et al. Lake salinization drives consistent losses of zooplankton abundance and diversity across coordinated mesocosm experiments. *Limnol. Oceanogr. Lett.* 2023; 8(1):19–29. doi: 10.1002/lol2.10239
- Janssen A. B., Teurlincx S., An S., Janse J. H., Paerl H. W., Mooij W. M. Alternative stable states in large shallow lakes? *J. Great Lakes Res.* 2014;40(4): 813–826. doi: 10.1016/j.jglr.2014.09.019
- Keith D. A., Ferrer-Paris J. R., Nicholson E., Bishop M. J., Polidoro B. A., Ramirez-Llodra E., Tozer M. G., Nel J. L., Mac Nally R., Gregr E. J., Watermeyer K. E. A function-based typology for Earth's ecosystems. *Nature*. 2022;610(7932):513–518. doi: 10.1038/s41586-022-05318-4
- Khlebovich V. V. Critical salinity of biological processes. Leningrad: Nauka; 1974. 236 p. (In Russ.)
- Khlebovich V. V. Critical salinity as a marker of the transition from the potassium era of life development to the sodium era. *Uspekhi sovremennoi biologii = Advances in Modern Biology*. 2015;135(1):18–20. (In Russ.)
- Kong R., Xue F., Wang J., Zhai H., Zhao L. Research on mineral resources and environment of salt lakes in Qinghai Province based on system dynamics theory. *Resour. Policy*. 2017;52:19–28. doi: 10.1016/j.resourpol.2017.01.006
- Last W. M., Ginn F. M. Saline systems of the Great Plains of western Canada: an overview of the limnogeology and paleolimnology. *Saline Syst.* 2005;1:1–38. doi: 10.1186/1746-1448-1-10
- Li X. Y., Shi F. Z., Ma Y. J., Zhao S. J., Wei J. Q. Significant winter CO<sub>2</sub> uptake by saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau. *Glob. Change Biol.* 2022;28(6): 2041–2052. doi: 10.1111/gcb.16054
- Lin Q., Xu L., Liu Z., Jeppesen E., Han B. P. Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in Tibetan Lakes: Implication for the effect of climate warming. *Water Res.* 2017;124: 618–629. doi: 10.1016/j.watres.2017.07.078
- Menshutkin V.V. The art of modeling (ecology, physiology, evolution). Petrozavodsk-St. Petersburg: KarRC RAS; 2010. 416 p. (In Russ.)
- Message M. L., 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
- Moffett E. R., Baker H. K., Bonadonna C. C., Shurin J. B., Symons C. C. Cascading effects of freshwater salinization on plankton communities in the Sierra Nevada. *Limnol. Oceanogr. Lett.* 2020;8(1):30–37. doi: 10.1002/lol2.10177
- Mooij W. M., Trolle D., Jeppesen E., Arhonditsis G., Belolipetsky P. V., Chitamwebwa D. B., Degermendzhy A. G., De Angelis D. L., De Senerpont Domis L. N., Downing A. S., Elliott J. A. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approaches. *Aquat. Ecol.* 2010;44(3):633–667. doi: 10.1007/s10452-010-9339-3
- Naselli-Flores L., Zohary T., Padisák J. Life in suspension and its impact on phytoplankton morphology: an homage to Colin S. Reynolds. *Hydrobiologia*. 2021;848(1):7–30. doi: 10.1007/s10750-020-04217-x
- Oren A. Halophilic archaea on Earth and in space: growth and survival under extreme conditions. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2014;372(2030): 20140194. doi: 10.1098/rsta.2014.0194
- Oren A. Life at high salt concentrations. In *The Prokaryotes*. New York: Springer; 2006. P. 263–282.
- Reynaud A., Lanzaova D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes. *Ecol. Econ.* 2017;137:184–194. doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.03.001
- Saccò M., Whit N. E., Harrod C., Salazar G., Aguilar P., Cubillos C. F., Meredith K., Baxter B. K., Oren A., Anufrieva E., Shadrin N. Salt to conserve: A review on the ecology and preservation of hypersaline ecosystems. *Biol. Rev.* 2021;96(6):2828–2850.
- Shadrin N. V. The alternative saline lake ecosystem states and adaptive environmental management. *J. Oceanol. Limnol.* 2018;36(6):2010–2017. doi: 10.1007/s00343-018-7307-2
- Shadrin N., Yakovenko V., Anufrieva E. Can *Gammarus aequicauda* (Amphipoda) suppress a population of *Baeotendipes noctivagus* (Chironomidae) in a hypersaline lake? A case of Lake Moynaki (Crimea). *Aquac. Res.* 2021;52:1705–1714. doi: 10.1111/are.15024
- Skarlato S.O., Telesh I. V. Development of the concept of maximum protist diversity in the critical salinity zone. *Biologiya morya = Biology of the Sea*. 2017;43(1):3–14. (In Russ.)
- Sommer U., Adrian R., De Senerpont Domis L., Elser J. J., Gaedke U., Ibelings B., Jeppesen E., Lüring M., Molinero J. C., Mooij W. M., Van Donk E. Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) model: Mechanisms driving plankton succession. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2012;43:429–448. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110411-160251
- Sommer U., Gliwicz Z. M., Lampert W., Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie*. 1986;106(4):433–471.
- Steinman A. D., Cardinale B. J., Munns Jr W. R., Ogdahl M. E., Allan J. D., Angadi T., Bartlett S., Brauman K., Byappanahalli M., Doss M., Dupont D. Ecosystem services in the Great Lakes. *J. Great Lakes Res.* 2017;43(3):161–168. doi: 10.1016/j.jglr.2017.02.004
- Sterner R. W., Keeler B., Polasky S., Poudel R., Rhude K., Rogers M. Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes. *Ecosyst. Serv.* 2020;41:101046. doi: 10.1016/j.ecoser.2019.101046
- Telesh I., Schubert H., Skarlato S. Life in the salinity gradient: discovering mechanisms behind a new biodiversity pattern. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2013;135: 317–327. doi: 10.1016/j.ecss.2013.10.013
- Williams W. D. Guidelines of lake management. *Management of inland saline waters*. 1998. Vol. 6, no. 108.
- Williams W. D. What future for saline lakes? *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*. 1996;38(9):12–39. doi: 10.1080/00139157.1996.9930999

Williams W. D., Boulton A. J., Taaffe R. G. Salinity as a determinant of salt lake fauna: a question of scale. *Hydrobiologia*. 1990;197(1):257–266. doi: 10.1007/bf00026955

Wurtsbaugh W. A., Miller C., Null S. E., DeRose R. J., Wilcock P., Hahnenberger M., Howe F., Moore J. Decline of the world's saline lakes. *Nat. Geosci.* 2017;10(11):816–821. doi: 10.1038/NGEO3052

Xie Y., Zhang C., Lai Q. China's rise as a major contributor to science and technology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;111(26):9437–9442. doi: 10.1073/pnas.1407709111

Zadereev E. Salt lakes, surrounding environments and environmental management / Eds. M. Zheng, T. Deng, A. Oren. Introduction to salt lake sciences. Beijing: Science Press; 2018. P. 172–179.

Zadereev E., Drobotov A., Anishchenko O., Kolmakova A., Lopatina T., Oskina N., Tolomeev A. The structuring effects of salinity and nutrient status on zooplankton communities and trophic structure in Siberian lakes. *Water*. 2022;14(9):1468. doi: 10.3390/w14091468

Zadereev E., Lipka O., Karimov B., Krylenko M., Elias V., Pinto I. S., Alizade V., Anker Y., Feest A.,

Kuznetsova D., Mader A. Overview of past, current, and future ecosystem and biodiversity trends of inland saline lakes of Europe and Central Asia. *Inland Waters*. 2020;10(4):438–452. doi: 10.1080/20442041.2020.1772034

Zadereev E. S., Lopatina T. S., Ovchinnikov S. D., Oskina N. A., Drobotov A. V., Tolomeev A. P. The effect of salinity on the grazing rate and survival of *Daphnia magna* females adapted to different salinities. *Aquat. Ecol.* 2022;56:639–652. doi: 10.1007/s10452-021-09941-7

Zheng M. P. Classification of saline lakes and types of mineral deposit. *An introduction to saline lakes on the Qinghai – Tibet Plateau*. New York: Springer; 1997. P. 79–84. doi: 10.1007/978-94-011-5458-1\_5

Zohary T., Fishbein T., Shlichter M., Naselli-Flores L. Larger cell or colony size in winter, smaller in summer—a pattern shared by many species of Lake Kinneret phytoplankton. *Inland Waters*. 2017;7(2):200–209. doi: 10.1080/20442041.2017.1320505

Zsuga K., Inelova Z., Boros E. Zooplankton community structure in shallow saline steppe inland waters. *Water*. 2021;13:1164. doi: 10.3390/w13091164

Поступила в редакцию / received: 10.08.2025; принята к публикации / accepted: 17.09.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Егоров Александр Николаевич

д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: alex6-1@mail.ru

### Яскеляйнен Дарья Дмитриевна

студентка магистратуры

e-mail: dar.yasik@mail.ru

### Задереев Егор Сергеевич

канд. биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИБФ СО РАН; доцент СФУ

e-mail: egor@ibp.ru

## CONTRIBUTORS:

### Egorov, Alexander

Dr. Sci. (Geogr.), Leading Researcher

### Yaskelyaynen, Daria

Master's Student

### Zadereev, Egor

Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Biophysics, KRC SB RAS; Associate Professor, SibFU

УДК 556.16"32"(470.22)

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНОГО СТОКА РЕК КАРЕЛИИ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД ЗА 1993–2022 ГОДЫ

**А. Ф. Балаганский\*, А. В. Толстиков**

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

Особенностью современных изменений гидрологического режима некоторых рек Карелии является существенное увеличение водности в холодный период года. На рассматриваемой территории увеличение стока отмечается осенью и во все зимние месяцы, причем синхронно с ростом среднемесячной приземной температуры воздуха. Отмечено постепенное уменьшение, иногда до полного исчезновения, периода гидрологического режима «осенняя межень». Периоды осенней межени постепенно замещаются дождевыми паводками различного объема и длительности, часто продолжающимися до февраля. В ходе исследований обработаны ежедневные расходы воды 37 изученных водотоков Карелии за период 1993–2022 гг. В работе приводится сравнение стока рек в осенний период с самой многоводной ежегодной фазой гидрологического режима рек «весеннее половодье». Отмечено, что объем стока осенью превышает по водности фазу весеннего половодья. Средняя продолжительность осеннего паводочного периода (отсутствие межени) составляет 128 дней (реки бассейна Балтийского моря – 125 дней, реки бассейна Белого моря – 133 дня). Средняя дата начала периода осенних паводков для изученных рек бассейна Балтийского моря – 29 сентября, окончания – 1 февраля, для рек бассейна Белого моря – 17 сентября и 29 января соответственно. В исследуемый период водность фазы весеннего половодья постепенно уменьшается, а водность фазы осеннего периода возрастает. В среднем слой стока осеннего паводочного периода превышает слой стока весеннего половодья на 21 %. Причиной увеличения стока осенью могло стать установление мягких зим из-за повышения температурного фона, увеличения числа оттепелей и, как следствие, уменьшения глубины промерзания почв, грунтов и увеличения в них запасов воды.

**Ключевые слова:** водный сток; паводки; гидрологический режим; реки Карелии

Для цитирования: Балаганский А. Ф., Толстиков А. В. Изменчивость водного стока рек Карелии в осенний период за 1993–2022 годы // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 17–26. doi: 10.17076/lim2109

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы госзадания КарНЦ РАН «Комплексные исследования Белого моря в интересах развития Арктической зоны РФ» (FMEN-2021-0004).

# A. F. Balaganskiy\*, A. V. Tolstikov. VARIABILITY OF FALL RUNOFF TO KARELIAN RIVERS IN 1993–2022

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*kar\_shuia@mail.ru

A feature of modern changes in the hydrological regime of some Karelian rivers is a significant increase in the water content during the cold period of the year. Runoff in the study area has been increasing in the fall and in all winter months, and in synchrony with the rise in mean monthly surface air temperature. In Karelian rivers, the hydrological regime period called the “fall low water” has been gradually shrinking, sometimes to the point of disappearance. The fall low-water periods are gradually getting replaced by rainfall-induced freshets of varying volume and duration, which often last until February. The paper compares the river runoff in the fall period against the highest-water phase of the river’s hydrological regime – the spring high-water period – by processing data on daily discharges for 37 watercourses of Karelia over the period 1993–2022. The fall runoff volume is shown to exceed the water content during the spring high-water phase. The average duration of the fall freshets (non-low water period) is 128 days (125 for rivers of the Baltic Sea basin, 133 for rivers of the White Sea basin). On average, the fall freshets period for the rivers studied in the Baltic Sea basin begins on September 29 and ends on February 1, for river of the White Sea basin it begins on September 17, ending on January 29. During the period under study, the water content of the spring high-water phase has been gradually declining, and the water content in the fall has been growing. An average runoff depth of the fall freshets period is 21 % greater than that of the spring high-water period. Meanwhile, the highest water discharges in the fall are still 48 % lower than the highest water discharges of the spring high-water phase (according to the sample of averages). The presumed reason for the increase in runoff in the fall is that winters have become milder due to a warmer temperatures background, an increase in the number of thaws and a consequential reduction in soil freezing depth and an increase in soil water reserves.

Keywords: runoff; freshets; hydrological regime; rivers of Karelia

For citation: Balaganskiy A. F., Tolstikov A. V. Variability of fall runoff to Karelian rivers in 1993–2022. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 17–26. doi: 10.17076/lim2109

Funding. The work was carried out under state assignment to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, theme “Comprehensive studies of the White Sea for promoting the development of the Russian Arctic zone” (FMEN-2021-0004).

## Введение

На территории Республики Карелия сформировалась развитая гидрографическая сеть, относящаяся к бассейнам Балтийского и Белого морей. Она представлена либо небольшими реками, либо короткими водотоками, соединяющимися с многочисленными озерами, образуя озерно-речные системы. Линейная озерность (отношение длины озерных участков к общей длине системы) в таких водотоках может достигать 60 %. Общее число рек Карелии (вместе с Карельским перешейком) составляет 26,7 тыс., их суммарная протяженность 83 тыс. км, а густота речной сети 0,53 км/км<sup>2</sup> [Литвиненко, 2024]. Тем не менее преобладают водотоки длиной менее 10 км (их число 25,3 тыс., или 95 % от всех рек). Лишь 30 водотоков на территории Карелии имеют длину более 100 км и относятся к классу средних.

Русла карельских рек слабо врезаны, что объясняется особенностями кристаллического фундамента и молодостью гидрографической сети, речные долины не развиты, продольный профиль часто ступенчатый, а плесовые участки обычно занимают озера. Еще одна особенность – близость соседних водотоков друг к другу [Литвиненко, 2024].

Происходящие с конца 70-х годов XX в. изменения климата заметно повлияли на характер формирования водного режима рек европейской части России, что представлено в исследованиях [Водные..., 2008; Современные..., 2015]. Температура воздуха на данной территории начала заметно расти в конце 1980-х годов, в XXI в. ее рост усилился [Назарова, 2017], увеличилось количество осадков [Серых, Толстиков, 2022; Толстиков, Серых, 2025], однако интенсивность потепления по сезонам происходит с различной скоростью. Большое влияние

оказывает подстилающая поверхность, особенности микрорельефа. Поверхностный сток рек европейской части России усилился примерно со второй половины 80-х годов XX в. [Магрицкий и др., 2019] и далее продолжал расти до начала XXI в., в период с 2007 по 2015 г. сток на водосборе Белого моря снижался, а затем был близок к норме [Толстиков и др., 2021].

Основной особенностью современных изменений гидрологического режима рек Карелии является существенное увеличение водности в холодный период года. На рассматриваемой территории отмечается увеличение стока осенью, а также во все зимние месяцы, причем это происходит синхронно с ростом среднемесячной приземной температуры воздуха [Серых, Толстиков, 2022; Толстиков, Серых, 2025]. Причина увеличения стока в это время года может быть в том, что из-за повышения температурного фона установились более мягкие зимы, увеличилось число оттепелей и, как следствие, уменьшилась глубина промерзания почв, грунтов, а запасы воды в них, таким образом, увеличились. Наиболее ярко этот процесс наблюдается при высоком залегании грунтовых вод [Лавров, 2024].

Наблюдаемое потепление может оказывать влияние на изменение ряда других климатических характеристик посредством различных прямых и обратных связей в климатической системе. Например, согласно [Третий..., 2022], это касается таких показателей, как средние сезонные осадки, экстремальность режима осадков, облачность, характеристики снежного покрова, сроки замерзания и вскрытия рек.

Гидрологический словарь [Чеботарев, 1978] дает определение следующим терминам. Паводок – быстрый, сравнительно кратковременный подъем уровня воды в каком-либо фиксированном створе реки, с почти столь же быстрым спадом и, в отличие от половодья, возникающий нерегулярно. Межень – период внутригодового цикла, в течение которого наблюдается низкая водность реки. В периоды межени преобладающее значение в речном стоке имеют подземные воды, дренируемые гидрографической сетью. К летне-осенней межени относят период от конца половодья до начала зимнего периода.

Цель данной работы – количественно оценить повышение водности в реках Карелии в холодное время года. В настоящее время на большинстве рек Карелии осенью постепенно уменьшается по продолжительности или даже совсем пропадает фаза межени. Поскольку для указанного периода повышения водности в это время года в гидрологическом цикле нет

четкого определения, а данный процесс в большей степени относится к осени, мы будем использовать понятие «осенний паводочный период» (ОПП).

## Материалы и методы

Проведен анализ ОПП 37 водотоков Карелии (табл.), изученных в гидрологическом отношении, отдельно по бассейну Белого и бассейну Балтийского моря за период 1993–2022 гг. Согласно [СП 11-103-97], ряд максимальных расходов воды рек может быть признан достаточным для определения расчетных расходов, если продолжительность периода наблюдений составляет не менее 25 лет для лесотундровой и лесной зон, поэтому выбранный нами период репрезентативен. Гидрологический режим исследуемых водотоков естественный, с различной степенью озерного регулирования. Из анализа исключены реки с искусственным регулированием и реки со значительным естественным озерным регулированием (на р. Сянга с относительной озерностью 25 %, бассейн Балтийского моря, фазы гидрологического режима размыты и не выделяются).

Расчеты производились на основе базы данных ИВПС КарНЦ РАН «Сток рек бассейна Белого моря» [Карпечко и др., 2018], автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) (<https://gmvo.skniivh.ru>) и Федерального агентства водных ресурсов (<https://voda.gov.ru>).

Площадь водосбора у подавляющего числа исследуемых рек небольшая, она варьирует от 245 до 12 000 км<sup>2</sup> (до створа водомерного поста) у семи изученных и принятых для анализа данных наблюдений за гидрологическим режимом рек бассейна Балтийского моря, и пять рек бассейна Белого моря имеют площадь от 1000 до 5000 км<sup>2</sup>. От 5000 до 10 000 км<sup>2</sup> площади водосбора имеют две реки бассейна Балтийского моря и одна река бассейна Белого моря. Площадь водосбора двух рек бассейна Балтийского моря превышает 10 000 км<sup>2</sup>.

В случае перехода осеннего периода с 2022 на 2023 год, данные не приводились в связи с их отсутствием.

В исследовании применен модульный коэффициент отношения слоя стока к общей продолжительности периода в сутках:

$$k = \frac{H}{t},$$

где  $H$  – слой стока, мм;  $t$  – период, сутки.

Коэффициент вариации рассчитан по формуле [СП 529.1325800.2023]:

C\_v = \sqrt{\frac{\sum\_{i=1}^n (k\_i - 1)^2}{n - 1}}

где n – общее число членов ряда, k\_i – модульный коэффициент гидрологической характеристики, определяемой по формуле:

k\_i = \frac{Q\_i}{\bar{Q}}

\bar{Q} – среднеарифметическое значение гидрологической характеристики, определяемой по формуле:

\bar{Q} = \frac{\sum\_{i=1}^n Q\_i}{n}

Слой стока рассчитывался по формуле:

H\_{mm} = \frac{W}{F \* (10)^3} = \frac{\bar{Q} \* T}{F \* (10)^3},

где W – объем стока водотока, T – период, сек., F – площадь водосбора, км².

Для анализа принимались ежедневные расходы воды. Анализ стока приведен вне зависимости от площади водосборов (районирован), поскольку ранжирование по площадям водосборов не выявило каких-либо значимых связей. Отбраковывались данные наблюдений за стоком рек с искусственным, зарегулированным гидрологическим режимом либо рек со значительным естественным озерным регулированием. За начало ОПП принимались периоды с устойчивым продолжительным увеличением стока рек.

Реки Карелии, используемые в анализе, с порядковыми номерами и площадями водосбора  
Rivers of Karelia used in the study with ordinal numbers and catchment areas

| Реки водосбора Балтийского моря / Rivers of the Baltic Sea basin |                                                            |                                                            |                                                             |                                                                     |                                                                  |                                                          |                                                                               |                                                          |                                                           |                                                                    |                                                                 |                                                                         |                                                          |                                                              |                                                                    |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--|
| р. Лендерка – п. Лендеры<br>r. Lenderka – Lendery village        | р. Ууксу – д. Ууксу<br>r. Uuksu – Uuksu village            | р. Тулемайоки – пгт Салми<br>r. Tulemayoki – Salmi village | р. Эняйоки – д. Раймяля<br>R. Enyajoki – Ryaimyalya village | р. Видлица – с. Большие Горы<br>r. Vidlitsa – Bol'shie Gory village | р. Новзема – с. Видлица<br>r. Novzema – Vidlitsa village         | р. Олонка – с. Верховье<br>r. Olonka – Verhov'ye village | р. Олонка – г. Олонец<br>r. Olonka – Olonets City                             | р. Мергега – д. Куйтежа<br>r. Megrega - Kuitezha village | р. Ивина – пгт Ладва<br>r. Ivina – Ladva village          | р. Лососинка – г. Петрозаводск<br>r. Lososinka – Petrozavodsk City | р. Шуя – д. Бесовец<br>r. Shuya – Besovets village              | р. Святрека – пгт Пряжа<br>Svyatreka river – Pryazha village            | р. Суна – пгт Поросозеро<br>r. Suna – Porosozero village | р. Уница – с. Уница<br>r. Unita – Unita village              | р. Кумса – г. Медвежьегорск<br>r. Kumsa – Medvezhegorsk City       | р. Немина – п. Немино 3<br>r. Nemina – Nemino 3 village | р. Пяльма – д. Пяльма<br>r. Pyalma – Pyalma village | р. Водла – д. Водла<br>r. Vodla – Vodla village | р. Водла – г. Пудож<br>r. Vodla – Pudozh City | р. Шалица – п. Онежский<br>r. Shalitsa – Onezhsky village |  |
| Площадь водосбора, км² / Catchment area, km²                     |                                                            |                                                            |                                                             |                                                                     |                                                                  |                                                          |                                                                               |                                                          |                                                           |                                                                    |                                                                 |                                                                         |                                                          |                                                              |                                                                    |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |
| 3990                                                             | 1080                                                       | 1700                                                       | 450                                                         | 977                                                                 | 245                                                              | 1090                                                     | 2120                                                                          | 378                                                      | 841                                                       | 318                                                                | 9560                                                            | 355                                                                     | 3370                                                     | 340                                                          | 735                                                                | 601                                                     | 908                                                 | 8010                                            | 12000                                         | 593                                                       |  |
| Номер водотока в анализе / Watercourse number in the analysis    |                                                            |                                                            |                                                             |                                                                     |                                                                  |                                                          |                                                                               |                                                          |                                                           |                                                                    |                                                                 |                                                                         |                                                          |                                                              |                                                                    |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |
| 1                                                                | 2                                                          | 3                                                          | 4                                                           | 5                                                                   | 6                                                                | 7                                                        | 8                                                                             | 9                                                        | 10                                                        | 11                                                                 | 12                                                              | 13                                                                      | 14                                                       | 15                                                           | 16                                                                 | 17                                                      | 18                                                  | 19                                              | 20                                            | 21                                                        |  |
| Реки водосбора Белого моря / Rivers of the White Sea basin       |                                                            |                                                            |                                                             |                                                                     |                                                                  |                                                          |                                                                               |                                                          |                                                           |                                                                    |                                                                 |                                                                         |                                                          |                                                              |                                                                    |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |
| р. Така – пгт Кестенга<br>r. Taka – Kestenga village             | р. Понча – п. Пяозерский<br>r. Poncha – Pyaozersky village | р. Кузема – с. Кузема<br>r. Kuzema – Kuzema village        | р. Судно – д. Вокнаволок<br>r. Sudno –Voknavolok village    | р. Ухта – пгт Калевала<br>r. Ukhta – Kalevala village               | р. Чирка-Кемь – с. Юшкозеро<br>r. Chirka-Kem –Yushkozero village | р. Шуя – с. Шуерецкое<br>r. Shuya – Shueretskoye village | р. Выг (Верхний Выг) – д. Огорельши<br>r.Vyg (Upper Vyg) – Ogorelyshi village | р. Лекса – п. Сергиево<br>r. Leksa – Sergievo village    | р. Вожма – п. Вожмозеро<br>r. Vozhma – Vozhmozero village | р. Волома – д. Венгигора<br>r. Voloma – Vengigora village          | р. Онигма – п. Черный Порог<br>r. Onigma – Cherny Porog village | р. Тунгуда – п. Новое Машезеро<br>r. Tunguda – Novoуe Mashezero village | р. Летняя – п. Летний<br>r. Letnyaya – Letniy village    | р. Сума – с. Сумский Посад<br>r. Suma – Sumsky Posad village | р. Малошуйка – ст. Малошуйка<br>r. Maloshuika – Matoshuika village |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |
| Площадь водосбора, км²/ Catchment area, km²                      |                                                            |                                                            |                                                             |                                                                     |                                                                  |                                                          |                                                                               |                                                          |                                                           |                                                                    |                                                                 |                                                                         |                                                          |                                                              |                                                                    |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |
| 130                                                              | 734                                                        | 882                                                        | 1160                                                        | 361                                                                 | 8220                                                             | 934                                                      | 2210                                                                          | 463                                                      | 595                                                       | 1860                                                               | 349                                                             | 1209                                                                    | 570                                                      | 1990                                                         | 481                                                                |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |
| Номер водотока в анализе / Watercourse number in the analysis    |                                                            |                                                            |                                                             |                                                                     |                                                                  |                                                          |                                                                               |                                                          |                                                           |                                                                    |                                                                 |                                                                         |                                                          |                                                              |                                                                    |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |
| 1                                                                | 2                                                          | 3                                                          | 4                                                           | 5                                                                   | 6                                                                | 7                                                        | 8                                                                             | 9                                                        | 10                                                        | 11                                                                 | 12                                                              | 13                                                                      | 14                                                       | 15                                                           | 16                                                                 |                                                         |                                                     |                                                 |                                               |                                                           |  |

## Результаты и обсуждение

В процессе изучения гидрологического режима рек Карелии выявлено, что за период 1993–2022 гг. их водный сток осенью от года к году растет. Сезонные паводки повышают уровень рек, что может продолжаться до февраля-марта практически без перерывов перехода водотоков на грунтовое питание. Отсутствие дождевых паводков наблюдается лишь в единичные маловодные годы. Примером является р. Тулема-йоки (рис. 1).

Видно, как отличаются гидрографы в маловодный год и при значительном объеме паводочного стока осенью (рис. 1). В маловодный год, а на данной реке за исследуемый период это был лишь 2002 г., максимум выделяется в половодье поздней весной, остальные месяцы можно отнести к межени. Совсем другая картина наблюдается, когда ОПП продолжается без перерыва на межень до февраля-марта (рис. 1, б). Этот вариант в режиме рек Карелии выражен последние годы все чаще. Расходы рек осенью приближаются к объемам воды в половодье, при этом продолжительный многоводный период ОПП приводит к пониженному весеннему стоку.

Средняя дата начала периода осенних паводков для изученных рек бассейна Балтийского моря составляет 29 сентября, окончания – 1 фев-

раля, для рек бассейна Белого моря дата начала – 17 сентября, окончания – 29 января. Вариация дат начала/окончания ОПП значительна (рис. 2).

На рис. 2 видно, что средняя продолжительность весеннего половодья – это 2–3 мес., однако в отдельных случаях может затянуться на 4–5 мес. (р. Тунгуда, озерность водосбора 18 %). В то же время ОПП может превышать 7 месяцев (р. Шуя, р. Водла (бассейн Балтийского моря)), а в среднем продолжается дольше половодья – 4–5 месяцев. Для рек бассейна Белого моря ОПП более продолжителен.

В некоторых случаях (независимо от принадлежности рек к какому-либо из рассматриваемых бассейнов) ОПП начинается в июле, без уменьшения объема стока водотоков до грунтовой фазы (межень), и продолжается до марта. Иногда ОПП начинается в октябре и продолжается не более трех недель. В отдельных случаях фаза большой водности начинается в январе и не снижается до начала весеннего половодья.

Средняя продолжительность ОПП (отсутствие меженного периода) составляет 128 дней (реки бассейна Балтийского моря – 125 дней, Белого моря – 133 дня).

По сравнению с фазой весеннего половодья внутригодовая фаза ОПП более плавная и менее интенсивная, водность реки в ОПП увеличивается достаточно медленно.

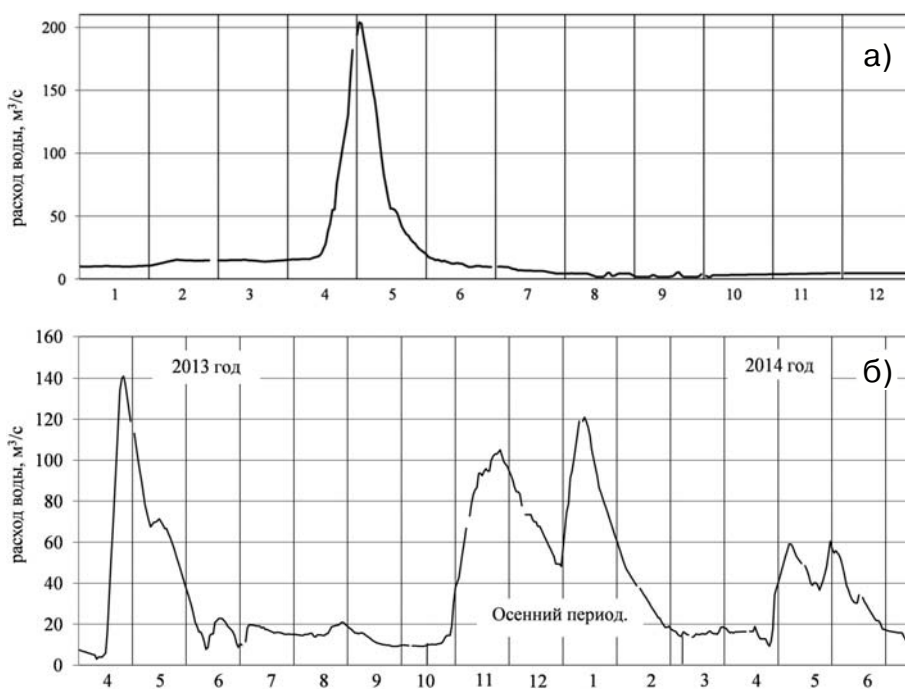


Рис. 1. Внутригодовое распределение стока реки Тулемайоки – пгт Салми 2002 г. (а) и 2013–2014 гг. (б). По оси ОХ показаны месяцы

Fig. 1. Intra-annual distribution of the Tulemayoki River runoff – Salmi urban settlement in 2002 (a) and 2013–2014 (b). The months are shown on the OX axis

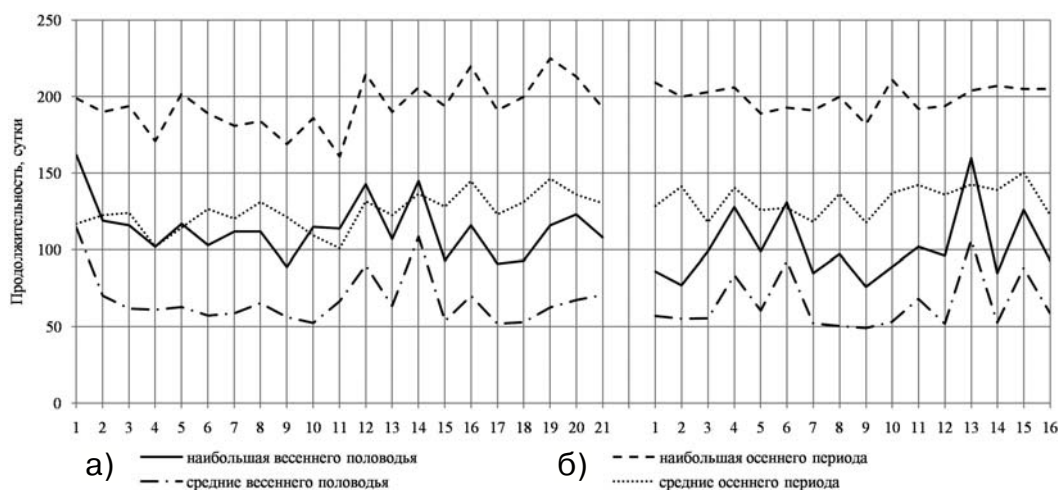


Рис. 2. Средняя и наибольшая продолжительность фаз весеннего половодья и осеннего периода (сутки) для рек водосбора Балтийского моря (а) и рек водосбора Белого моря (б). Цифры по оси ОХ соответствуют номерам водотоков из таблицы

Fig. 2. The average and longest duration of the spring flood phases and autumn period (days) for the rivers of the Baltic Sea basin (а) and the rivers of the White Sea basin (б). The numbers on the ОХ axis correspond to the numbers of the watercourses in the Table

На рис. 3 изображены максимальные по водности фазы ОПП. Такие явления наблюдаются на реках Карелии практически ежегодно.

Характерная фаза ОПП (для водотоков бассейнов Балтийского, и Белого моря) представляет собой плавное увеличение водности осенью, однако не достигающее в большинстве случаев величин характеристик стока в весеннее половодье. Тем не менее на фоне плавно-

го хода проявляются отдельные максимумы, связанные, вероятно, с интенсивным выпадением жидких или смешанных осадков в холодный период года в результате резкого повышения температуры воздуха в зимний период. Поскольку фаза ОПП продолжается долго, объем стока в этот период соразмерен или превышает по водности фазу весеннего половодья на всех реках Карелии.

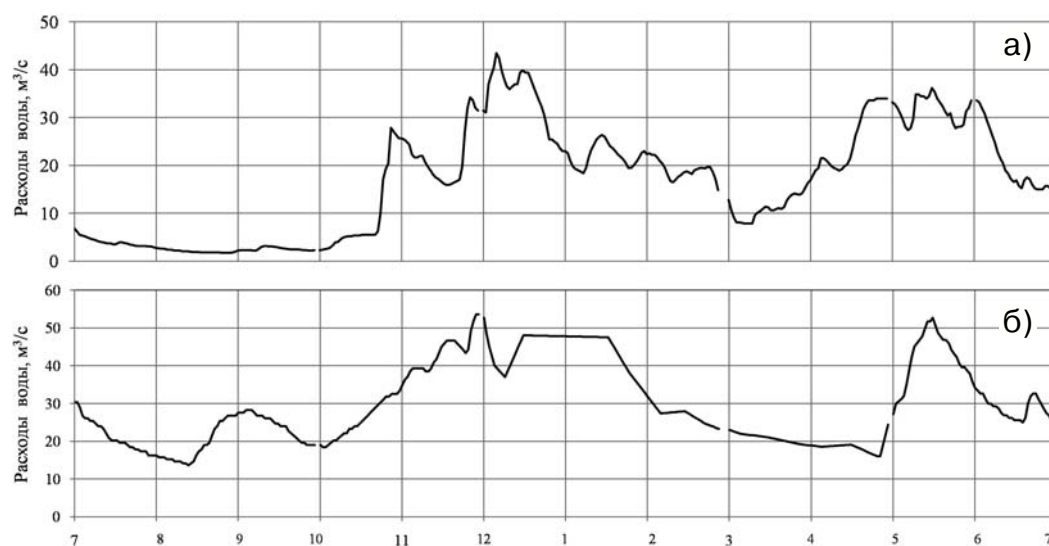


Рис. 3. Фаза ОПП до начала весеннего половодья для р. Уксунйоки (д. Ууксу), 2006–2007 гг. (бассейн Балтийского моря) (а) и р. Сума (с. Сумский Посад) 2008–2009 гг. (бассейн Белого моря) (б). Цифры на оси ОХ соответствуют месяцу

Fig. 3. The phase of the autumn flood period before the spring flood for the Uksunoyki River (Uuksu village), 2006–2007 (Baltic Sea basin) (а) and the Suma River (Sumsky Posad village), 2008–2009 (White Sea basin) (б). The numbers on the ОХ axis correspond to the month

Средние слои весеннего стока за исследуемый период рек бассейна Балтийского моря превышают водность ООП на 19 %, бассейна Белого моря – на 24 %. Однако единичные наивысшие значения слоя стока ООП рядов рек превышают слои стока весеннего половодья для рек бассейна Балтийского моря на 23 %, бассейна Белого моря – на 14 %. Слой стока весеннего половодья за 1993–2022 гг. для бассейна Балтийского моря в среднем увеличивается на 8,3 %, для бассейна Белого моря уменьшается в среднем на 1,3 %. Наибольшие слои стока весеннего половодья меньше слоя стока ООП: для рек бассейна Балтийского моря на 25 %, для рек бассейна Белого моря – на 12 %. Отрицательные значения среднего (в %) отмечаются на реках Ивина, Лососинка, Уница, Пяльма, Онигма, Малошуйка, Верхний Выг (–1 %).

В исследуемый период водность фазы весеннего половодья постепенно уменьшается, а водность фазы ООП возрастает. Средний модульный коэффициент ООП составляет 1,0, средний коэффициент весеннего половодья – 2,7.

Число случаев продолжительности ООП для бассейнов Балтийского и Белого морей

примерно одинаково. От начала ООП до января встречается 22 случая на водоток, до февраля – 13 случаев, до марта – 4 случая, продолжительность до апреля – 0,9 случая на водоток.

Для расходов воды и слоев стока периода ООП тренды значимы для 30 и 35 % всех исследуемых водотоков соответственно. Для расходов воды и весеннего половодья тренды значимы для 54 и 2 % всех водотоков соответственно. Тренды временного ряда наибольших расходов воды весеннего половодья в периоды снеготаяния в реках за период 1993–2022 гг. отрицательные. Средний процент уменьшения мгновенных расходов воды весеннего половодья на территории Карелии составляет 73,5 %. При этом величина наибольших мгновенных расходов воды ООП в реках Карелии возрастает в среднем на 34 %.

На рис. 4 показаны слои весеннего половодья и осенне-зимнего дождевого паводка для реки водосбора Балтийского моря и реки водосбора Белого моря.

По графикам рис. 4 видно, что слои осенне-зимнего дождевого паводка имеют ярко выраженный положительный тренд, хотя это и происходит на фоне квазипериодичности.

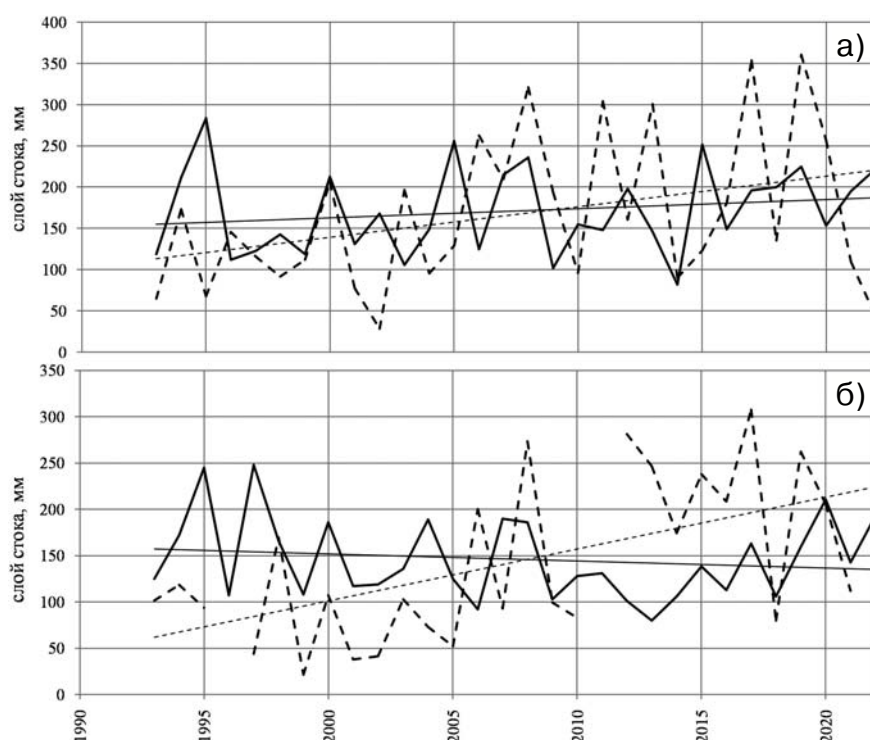


Рис. 4. Слои весеннего половодья (сплошная линия) и осенне-зимнего дождевого паводка (пунктирная линия) реки Уксунйоки – д. Ууксу (а) и реки Сума – с. Сумский Посад (б). Пропуски – нет данных

Fig. 4. Layers of spring flood (solid line) and autumn–winter rain flood (dotted line) of the Uksunyoki River – Uuksu village (a) and the Suma River – Sumsky Posad village (b). Gaps – no data

Водность рек в период половодья за рассматриваемый период понижается. В целом максимумы и минимумы всех водотоков происходят практически в одно и то же время, что дает нам право предположить о ведущем влиянии на это глобальных, а не региональных процессов. Такими внешними факторами являются потепление климата, увеличение количества осадков на территории Карелии и увеличение водности водотоков.

Средний коэффициент изменчивости слоя стока ОПП (коэффициент вариации  $C_v$ ) для рек бассейна Балтийского моря составляет 0,58, для рек Белого моря – 0,56.

Вариация слоя стока весеннего половодья имеет меньшую изменчивость по сравнению с ОПП: для рек бассейна Балтийского моря она составляет 0,27, для рек Белого моря – 0,25. Вариация наибольших расходов воды весеннего половодья: для рек бассейна Балтийского моря – 0,58, для рек Белого моря – 0,56.

На рис. 5 представлены наибольшие расходы воды весеннего половодья и осеннего паводочного периода для реки водосбора Балтийского и водосбора Белого моря.

По графикам максимальных расходов (рис. 5) очень хорошо прослеживается тенден-

ция повышения водности рек в ОПП за последние годы и снижения водности во время весеннего половодья.

## Заключение

За последние 30 лет (1993–2022 гг.) на реках Карелии зафиксировано наличие осеннего паводочного периода, начинающегося от фазы окончания летней межени (август – начало сентября) до первой трети зимнего периода (январь–февраль). При этом на реках южной части Карелии проявление осенних межени периодов наблюдается в единичных случаях, в основном в 2002 году. Беспаводочные периоды наблюдались на 11 реках бассейна Балтийского моря в Карелии. Для карельской части бассейна Белого моря беспаводочный осенний период 1993–2022 гг. отмечался всего на трех реках: Кузема (два случая), Чирка-Кемь (три случая), Сума (два случая). Средняя продолжительность ОПП (отсутствие межени периода) составляет 128 дней (реки бассейна Балтийского моря – 125 дней, Белого моря – 133 дня). Средняя дата начала периода осенних паводков для изученных рек бассейна Балтийского моря – 29 сентября,

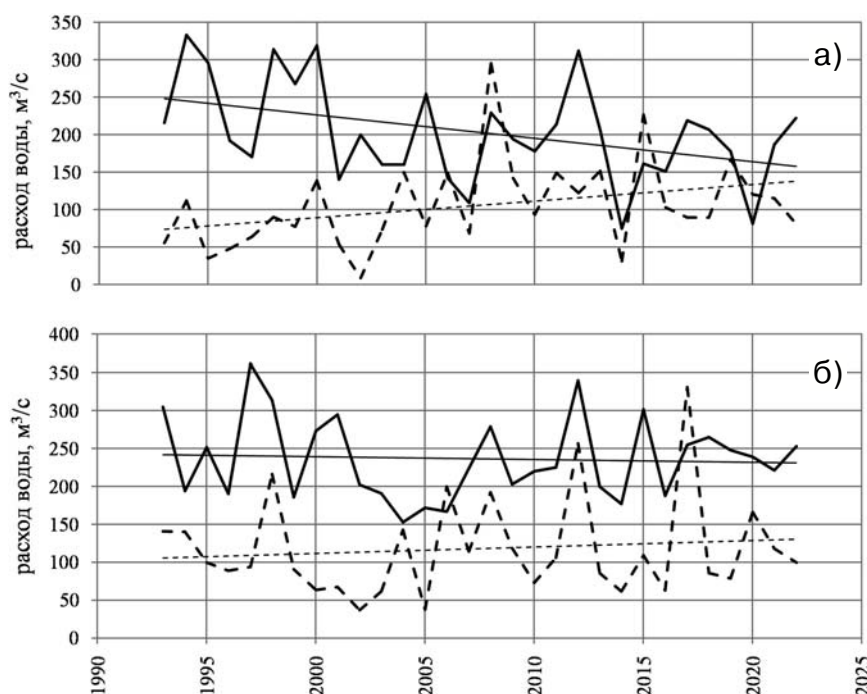


Рис. 5. Наибольшие расходы воды весеннего половодья (сплошная линия) и осеннего периода (пунктирная линия). Река Олонка – г. Олонек (а) и река Чирка-Кемь – с. Юшкозеро (б)

Fig. 5. The largest runoff of the spring flood (solid line) and autumn period (dotted line). The Olonka River – the Olonets City (a) and the Chirka-Kem' River – Yushkozero village (b)

окончания – 1 февраля, для рек бассейна Белого моря – 17 сентября и 29 января соответственно.

В исследуемый период водность фазы весеннего половодья постепенно уменьшается, а водность фазы ОПП возрастает. Тренды временного ряда наибольших расходов воды весеннего половодья в периоды снеготаяния в реках за 1993–2022 гг. отрицательные. Мгновенный сток весеннего половодья за исследуемый период для территории Карелии уменьшился в среднем на 73,5 %. Объем стока фазы ООП увеличивается на 45 % в среднем по Карелии, а фазы весеннего половодья – на 4 %.

Вероятно, этот процесс является прямым свидетельством изменения климата для рассматриваемой территории. Приземная температура воздуха за 1993–2022 гг. в холодный период года увеличилась, количество осадков также повысилось. Все это отразилось на внутригодовом перераспределении стока рек Карелии.

## Литература

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. проф. И. А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.

Карпечко В. А., Махальская Н. И., Балаганский А. Ф., Толстиков А. В. Сток рек бассейна Белого моря. Свид-во о гос. рег. базы данных № 2018621833 РФ. Заявка № 2018621418. Запег. 08.10.2018. Опубл. 19.11.2018.

Лавров С. А. Влияние климатических изменений на процессы формирования стока на водосборах. СПб.: Свое издательство, 2024. 294 с.

Литвиненко А. В. Комплексная характеристика водной сети Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 6–24. doi: 10.17076/lm1829

Назарова Л. Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // Известия РГО. 2017. Т. 149, вып. 5. С. 16–24.

Магрицкий Д. В., Повалишникова Е. С., Фролова Н. Л. История изучения стока воды и водного режима рек Арктической зоны России в XX в. и начале XXI в. // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 61–96. doi: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939

Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России: формирование, распределение, использование / Под ред. Р. Г. Джамалова, Н. Л. Фроловой. М.: ГЕОС, 2015. 320 с.

Серых И. В., Толстиков А. В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Ч. 1: Температура воздуха, осадки, ветер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 3. С. 258–277. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277

СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М., 2023. 103 с.

СП 11-103-97. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. М., 1997. 33 с.

Толстиков А. В., Балаганский А. Ф., Чернов И. А. Оценка теплового стока рек водосбора Белого

моря // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2021. № 3. С. 109–119.

Толстиков А. В., Серых И. В. Климатические изменения количества осадков в регионе Белого моря и их расчет по моделям CMIP6 до 2099 г. // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15, № 3. С. 30–41. doi: 10.25283/2223-4594-2025-3-30-41

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологические, 2022. 124 с.

Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 308 с.

## References

Chebotaev A. I. Hydrological dictionary. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1978. 308 p. (In Russ.)

Dzhamalova R. G., Frolova N. L. (eds.). Modern resources of groundwater and surface waters of the European part of Russia: Formation, distribution, use. Moscow: GEOS; 2015. 320 p. (In Russ.)

Karpechko V. A., Makhal'skaya N. I., Balaganskii A. F., Tolstikov A. V. River runoff of the White Sea basin. Certificate of state registration of database No. 2018621833. Appl. No. 2018621418. Reg. 08.10.2018. Iss. 19.11.2018. (In Russ.)

Lavrov S. A. The impact of climate change on runoff formation processes in catchments. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2024. 294 p. (In Russ.)

Litvinenko A. V. A comprehensive account of the Karelian water network. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024;2:6–24. (In Russ.). doi: 10.17076/lm1829

Magritskii D. V., Povalishnikova E. S., Frolova N. L. History of studying the water runoff and water regime of the rivers of Russian Arctic zone in the XX – early XXI century. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctica*. 2019;3:61–96. (In Russ.). doi: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939

Nazarova L. E. Modern climatic conditions of the White Sea basin area. *Izvestiya RGO = Proceedings of the RGS*. 2017;149(5):16–24. (In Russ.)

Serykh I. V., Tolstikov A. V. Climate changes in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 1: Air temperature, precipitation, wind. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2022;68(3):258–277. (In Russ.). doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277

Shiklomanov I. A. (ed.). Water resources of Russia and their use. St. Petersburg: GGI; 2008. 600 p. (In Russ.)

SP 529.1325800.2023. Determination of the main design hydrological characteristics. Moscow; 2023. 103 p. (In Russ.)

SP 11-103-97. Engineering hydrometeorological survey for construction. Moscow; 1997. 33 p. (In Russ.)

Third assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation. Summary. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2022. 124 p. (In Russ.)

Tolstikov A. V., Balaganskii A. F., Chernov I. A. Assessment of thermal runoff of rivers in the White Sea catchment area. *Vestnik Moskovskogo universiteta*.

Ser. 5: *Geografiya* = *Bulletin of Moscow University. Ser. 5: Geography*. 2021;3:109–119. (In Russ.)

Tolstikov A. V., Serykh I. V. Climate changes in the amount of precipitation in the White Sea region and

their calculation using CMIP6 models up to 2099. *Arktika: ekologiya i ekonomika* = *Arctic: Ecology and Economy*. 2025;15(3):30–41. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2025-3-30-41

*Поступила в редакцию / received: 19.05.2025; принята к публикации / accepted: 01.07.2025.*  
*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Балаганский Андрей Федорович**

главный гидролог лаборатории географии и гидрологии

*e-mail: kar\_shuia@mail.ru*

**Толстиков Алексей Владимирович**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник,  
руководитель лаборатории географии и гидрологии

*e-mail: alexeytolstikov@mail.ru*

#### **CONTRIBUTORS:**

**Balaganskiy, Andrey**

Chief Hydrologist

**Tolstikov, Aleksey**

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Head of Laboratory

УДК 556:555

## ТЕРМИЧЕСКИЙ И ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В 2023–2024 ГОДАХ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА АВТОНОМНОЙ СТАНЦИИ

Г. Э. Здоровеннова\*, Р. Э. Здоровеннов, Ю. С. Новикова,  
Т. В. Ефремова

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

По данным измерений температуры воды на автономной станции в центральной глубоководной части Петрозаводской губы Онежского озера в 2023–2024 гг. определены даты установления и взлома льда, продолжительность ледостава, весеннего и осеннего перемешивания, летней стратификации. Выявлены отклонения этапов годового термического цикла от среднеемноголетних значений: установление льда в более ранние сроки на фоне холодных осенних месяцев, взлом льда в более ранние сроки на фоне теплых весенних месяцев, прохождение весеннего термобара на 10–15 дней раньше типичных сроков, продолжительность летней стратификации на месяц дольше. На фоне аномально теплых погодных условий августа и сентября в эти годы (среднемесячная температура воздуха в августе была выше климатической нормы 1991–2020 гг. на 1,7 °С, в сентябре – на 4,0 и 5,3 °С соответственно) биологическое лето продолжалось на 2–3 недели дольше нормы. Летом 2023 и 2024 годов в районе измерительной станции наблюдались повторяющиеся эпизоды резкого увеличения температуры придонного слоя воды с последующим возвратом к фоновым значениям. Опускание теплой воды из поверхностного слоя могло происходить при конвергенции течений. Периоды с аномально высокой температурой придонной воды (на 5–10 °С выше типичных значений) летом 2024 г. продолжались более 1,5 мес., что могло оказать негативное воздействие на среду обитания бентосного сообщества, адаптированного к более холодным условиям. Выявленные изменения термического и ледового режимов озера могут отразиться на функционировании экосистемы озера, что требует организации мониторинговых наблюдений.

Ключевые слова: Онежское озеро; термический режим; ледовый режим; температура воды; стратификация; перемешивание

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

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

**G. E. Zdorovennova\*, R. E. Zdorovennov, I. S. Novikova, T. V. Efremova.**  
**THERMAL AND ICE REGIMES IN PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGO IN**  
**2023–2024 BASED ON DATA OF MEASUREMENTS AT AN AUTONOMOUS**  
**STATION**

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

The ice-on and ice-off dates, the duration of the ice-covered period, spring and autumn mixing, and summer stratification were determined based on water temperature measurements at an autonomous station in the central deep-water part of Petrozavodsk Bay of Lake Onego in 2023–2024. Deviations were revealed in the stages of the annual thermal cycle from the average long-term values: ice-on occurred earlier in the cold autumn months, ice break-up happened earlier in the warm spring months, the spring thermal bar passed 10–15 days earlier than historically, and the duration of summer stratification was a month longer. Due to the abnormally warm weather in August and September in these years (the average monthly air temperature in August of both years was 1.7 °C higher than the 1991–2020 baseline, and in September 2023 and 2024 it was 4.0 and 5.3 °C higher, respectively), the biological summer lasted 2–3 weeks longer than normally. In the summer of 2023 and 2024, repeated episodes of a sharp rise in the temperature of the bottom water layer with a subsequent return to the background values were observed at the measuring station. The descent of warm water from the surface layer could occur during the convergence of currents. Periods with abnormally high bottom water temperatures (5–10 °C higher than typical values) in the summer of 2024 lasted for more than 1.5 months, which could have a negative impact on the benthic community adapted to colder conditions. The identified changes in the thermal and ice regimes of the lake may affect the functioning of the lake ecosystem, which requires monitoring arrangements to be made for the future.

**Keywords:** Lake Onego; thermal regime; ice regime; water temperature; stratification; mixing

For citation: Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Novikova I. S., Efremova T. V. Thermal and ice regimes in Petrozavodsk Bay of Lake Onego in 2023–2024 based on data of measurements at an autonomous station. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 27–38. doi: 10.17076/lim2114

**Funding.** The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS.

## **Введение**

Реакция термического и ледового режимов озер на климатическую изменчивость наиболее заметно проявляется в средних и высоких широтах [IPCC..., 2021]. В результате изменения погодных условий повышается температура верхнего слоя воды в озерах, усиливается стратификация, меняется режим перемешивания, сокращается период ледостава, уменьшается толщина ледяного покрова и меняется его структура [O'Reilly et al., 2015; Sharma et al., 2019; Woolway et al., 2019, 2020; Weyhenmeyer et al., 2022; Naderian et al., 2025]. Такие изменения представляют опасность для чувствительных экосистем северных озер, резко нарушая привычные для гидробионтов температурные, световые, гидродинамические условия среды обитания и сложившиеся пищевые цепочки [Hampton et al.,

2017, 2024; Jansen et al., 2021]. В частности, могут измениться фенологические фазы развития фитопланктона и зоопланктона [Winder, Schindler, 2004; Thackeray et al., 2008]. Кроме того, при изменении температуры воды и режима перемешивания меняются скорости химических реакций в водной толще и верхнем слое донных отложений озер [Gudas et al., 2010], что может оказывать влияние на кислородный режим, концентрации биогенных веществ и объемы эмиссии парниковых газов [Zhou et al., 2025]. Эти факторы определяют актуальность изучения изменений термического, гидродинамического и ледового режимов озер на фоне изменчивости климата.

Онежское озеро – одно из крупнейших озер Европы, уникальный водоем со сложным термодинамическим режимом. Региональная изменчивость климата южной части Карелии, выражающаяся в повышении температуры

воздуха во все сезоны года, изменении облачности и режима осадков [Назарова, 2023; Ефремова и др., 2024], обусловила изменения ледового и термического режимов этого глубоководного северного озера за последние несколько десятилетий [Крупнейшие..., 2015; Filatov et al., 2019], что, в свою очередь, оказывает влияние на условия обитания гидробионтов [Калинкина и др., 2021] и может отрицательно сказаться на качестве воды.

Наряду с измерениями температуры воды поверхностного слоя Онежского озера, которые проводятся на прибрежных гидрологических постах, важной задачей является организация измерений в глубоководных районах этого озера для выявления изменений режима перемешивания в связи с меняющимися погодными условиями. Такие измерения проводятся в Петрозаводской губе силами сотрудников Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. В центральной глубоководной части губы установлена автономная станция, которая представляет собой заякоренную косу с температурными датчиками RBR (точность 0,002 °C). Измерения проводятся с дискретностью в одну минуту. В 2015–2017 гг. измерения на термокосе проводились в весенние месяцы в рамках международного проекта «Life under ice», датчики были распределены от нижней поверхности льда до глубин 23,0–27,5 м; количество датчиков в разные годы изменялось от 16 до 69 шт., расстояние между датчиками составляло 0,3–2,0 м [Bogdanov et al., 2019]. Начиная с октября 2019 г. до настоящего времени измерения проводятся в кругло-

годовом режиме датчиками, распределенными по водному столбу в диапазоне глубин от 3–4 до 19 м; количество датчиков в разные периоды измерений составляло 13–16 шт. Датчики распределены по вертикали так, что часть из них попадает в верхний перемешанный слой, часть – в слой скачка, часть – в придонный стратифицированный слой. Анализ данных термокосы за 2019–2022 гг. позволил установить выраженную межгодовую изменчивость дат начала и продолжительности этапов годового термического цикла, вызванную погодными условиями [Здоровеннова и др., 2023]. В настоящей статье проанализированы данные измерений термокосы в период с октября 2022 г. по ноябрь 2024 г., проведено сравнение со среднемноголетними значениями [Крупнейшие..., 2015], а также с данными измерений на термокосе в 2019–2022 гг.

Цель работы – уточнение сроков основных гидрологических явлений на акватории Петрозаводской губы Онежского озера и выявление термогидродинамических особенностей по данным измерений температуры на автономной станции в период с октября 2022 г. по ноябрь 2024 г.

## Материалы и методы

Петрозаводская губа – один из заливов Онежского озера, акватория которого протянулась с северо-запада на юго-восток (рис. 1). Это достаточно глубокий залив с глубинами до 30 м, на выходе из губы глубины уменьшаются до 20–23 м. Ивановские острова отделяют губу от залива Большое Онего. Основным притоком губы является р. Шуя.

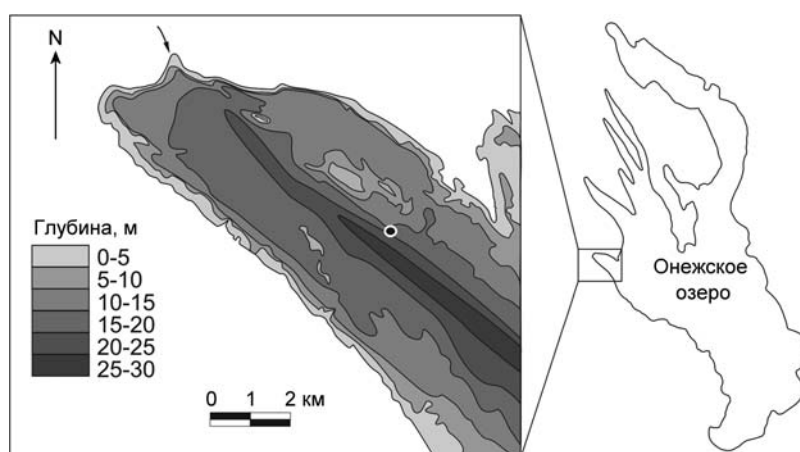


Рис. 1. Положение автономной станции (обозначено кружком) в центральной части Петрозаводской губы с октября 2022 по ноябрь 2024 г. Стрелкой показано место впадения р. Шуя

Fig. 1. Position of the autonomous station (circle) in the center of Petrozavodsk Bay from October 2022 to November 2024. The arrow shows the confluence of the Shuya River

Автономная станция установлена в центральной глубоководной части Петрозаводской губы на глубине 19,5 м (рис. 1). В таблице 1 приведены глубины датчиков и периоды измерений на термокосе.

По данным термокосы определены даты начала и окончания ледостава, продолжительность весеннего подледного прогрева и подледной радиационной конвекции, дата прохождения термобара весной, продолжительность стратификации, периода осеннего перемешивания, предледоставного периода, а также «биологического» лета, когда температура воды верхнего датчика термокосы (глубина 3–4 м) превышала 10 °С.

Начало ледостава определяли по следующим признакам: (1) исчезновение высокочастотных (минутных) колебаний температуры, которые присутствуют в записях верхних датчиков косы как проявление ветро-волнового перемешивания в условиях открытой воды, а также (2) устойчивое повышение температуры придонного слоя воды при продолжающемся понижении температуры верхнего. Начало периода весеннего подледного прогрева определяли по устойчивому повышению температуры воды на верхнем датчике термокосы. Дату взлома льда определяли по появлению высокочастотных (минутных) колебаний в записях верхних датчиков термокосы (проявление ветро-волнового перемешивания), а также по появлению резкого однократного скачка температуры в записях всех датчиков, который характерен для периода разрушения льда и обусловлен полным перемешиванием водного столба. Продолжительность весеннего перемешивания в условиях открытой воды

определяли от даты взлома льда до даты установления стратификации, которую, в свою очередь, определяли по превышению разницы 1 °С температуры по столбу воды между верхним и нижним датчиками для диапазона температур выше 4 °С. Дату прохождения весеннего термобара определяли по переходу температуры воды через 4 °С в сторону повышения. Продолжительность осеннего перемешивания определяли от даты окончания стратификации до даты перехода температуры воды через 4 °С в сторону понижения. Продолжительность предледоставного периода определяли от даты перехода температуры воды через 4 °С в сторону понижения до установления льда. Наряду с этим изучены некоторые особенности изменения температуры воды Петрозаводской губы в период ледостава и летней стратификации.

Погодные условия района исследований охарактеризованы по данным метеостанции Петрозаводск [Расписание..., 2025]. Проанализированы следующие параметры: средняя температура воздуха за каждый месяц года в период 2015–2024 гг., когда проводились измерения на автономной станции, и ее отклонения от климатической нормы 1991–2020 гг. Ранее был проведен анализ погодных условий 2015–2022 гг. в сравнении с климатической нормой 1961–1990 гг. [Здоровеннова и др., 2023]. Но поскольку решением Всемирной метеорологической организации изменен базовый период для расчета климатических норм, с 2022 г. подведомственные учреждения Росгидромета переходят на использование в оперативно-производственной практике климатических норм, рассчитанных за период 1991–2020 гг. [Доклад..., 2023].

Таблица 1. Периоды и глубины измерений температуры воды на автономной станции в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера с октября 2022 по ноябрь 2024 г.

Table 1. Periods and depths of water temperature measurements on the autonomous station in the center of Petrozavodsk Bay of Lake Onego from October 2022 to November 2024

| Период измерений<br>Period of measurements                             | Количество датчиков, глубины измерений, м<br>Number of sensors, depths of measurements, m                                           |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 21 октября 2022 г. – 14 мая 2023 г.<br>October 21, 2022 – May 14, 2023 | 16, от 3 до 18 м через 1 м<br>16, from 3 to 18 m, every 1 m                                                                         |
| 14 мая – 5 октября 2023 г.<br>May 14 – October 5, 2023                 | 16, от 4 до 19 м через 1 м<br>16, from 4 to 19 m, every 1 m                                                                         |
| 5 октября 2023 г. – 22 июня 2024 г.<br>October 5, 2023 – June 22, 2024 | 15, от 4 до 12 и от 14 до 19 м через 1 м<br>15, from 4 to 12 and from 14 to 19 m, every 1 m                                         |
| 22 июня – 7 ноября 2024 г.<br>June 22 – November 7, 2024               | 13, от 4 до 12 м через 1 м, далее на глубинах 14, 16, 17, 19 м<br>13, from 4 to 12 m, every 1 m, then at depths of 14, 16, 17, 19 m |
| 7 ноября 2024 г. – май 2025 г.<br>November 7 – May 2025                | 13, от 4 до 12 м через 1 м, далее на глубинах 14, 16, 17, 19 м<br>13, from 4 to 12 m, every 1 m, then at depths of 14, 16, 17, 19 m |

## Результаты и обсуждение

### Климатическая изменчивость Южной Карелии

В таблице 2 приведены значения средне-месячной температуры воздуха по МС Петрозаводск за базовые периоды 1961–1990 (БП1) и 1991–2020 (БП2) годов. Сравнение двух базовых периодов показывает, что за 30 лет произошло увеличение температуры воздуха во все месяцы года. Наибольшие положительные отклонения отмечены в зимние месяцы: температура декабря, января и февраля стала выше на 1,9, 3,0 и 1,6 °С соответственно. Наименьшее увеличение температуры воздуха (+0,5...+0,6 °С) произошло в мае, июне, октябре и ноябре, в остальные месяцы года рост температуры составил 0,9–1,2 °С.

В таблице 2 также приведены отклонения среднемесячной температуры воздуха в 2015–2024 гг. от этого показателя базового периода 1991–2020 гг. Чаще всего температура воздуха теплее нормы была в марте и ноябре (8 лет из 10); в феврале, мае, июне, августе и декабре также преобладали положительные отклонения от нормы (7 лет из 10). В апреле, июле и октябре повторяемость условий теплее и холоднее нормы была одинаковой (по пять лет).

По абсолютной величине отклонений от нормы в межгодовом аспекте наиболее изменчивые погодные условия были характерны для месяцев зимнего сезона с декабря по март, а также в июне и сентябре (отклонения от нормы как положительные, так и отрицательные, более чем на 4–6 °С в отдельные годы). В мае, июле, августе и ноябре погода была менее изменчива – отклонения от нормы не превышали 4 °С в разные годы. Наиболее стабильные погодные условия были в апреле и октябре (отклонения среднемесячной температуры воздуха от нормы не превышали 2 °С).

Погодные условия середины и конца осени 2022 г., зимнего сезона 2022–2023 гг. и весны 2023 г., когда температура воздуха превышала норму на 0,3–3,4 °С, были существенно теплее того же периода осени 2023 г., зимы 2023–2024 гг. и весны 2024 г. с температурой ниже нормы на 0,2–4,0 °С (табл. 2). Исключение составил теплый март 2024 г. с превышением нормы на 3,0 °С. Начало и середина лета в 2023 г. были заметно холоднее, чем в следующем 2024 г., а конец лета и начало осени в оба года были теплее нормы, с особенно теплыми условиями в сентябре (превышение нормы 1991–2020 гг. на 4,0–5,3 °С). В аномально теплом сентябре 2024 г. (среднемесячная температура 15,3 °С) более чем на градус превышен температурный

Таблица 2. Температура воздуха по месяцам (I–XII) в базовые периоды 1961–1990 (БП1) и 1991–2020 (БП2) годов, изменение температуры между базовыми периодами (БП2–БП1), а также отклонения среднемесячной температуры воздуха в 2015–2024 гг. от второго базового периода 1991–2020 гг. по МС Петрозаводск

Table 2. Air temperature by months of the year (I–XII) during the base periods 1961–1990 (BP1) and 1991–2020 (BP2), temperature change between the base periods (BP2–BP1), as well as deviations of average monthly air temperature in 2015–2024 from the second base period 1991–2020 according to the Petrozavodsk WS

|           | I           | II          | III         | IV          | V           | VI          | VII         | VIII        | IX          | X           | XI          | XII         |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1961–1991 | –11,4       | –9,8        | –4,4        | 1,5         | 8,4         | 13,5        | 16,1        | 14          | 8,8         | 3,3         | –2,5        | –7,6        |
| 1991–2020 | –8,4        | –8,2        | –3,5        | 2,5         | 8,9         | 14,1        | 17,1        | 15          | 10          | 3,8         | –1,9        | –5,7        |
| БП2–БП1   | 3           | 1,6         | 0,9         | 1           | 0,5         | 0,6         | 1           | 1           | 1,2         | 0,5         | 0,6         | 1,9         |
| 2015      | 1,3         | 5,5         | <b>4,2</b>  | –0,3        | 1,5         | 0,1         | –2,8        | 0,5         | 1,8         | –0,3        | 2,0         | 4,0         |
| 2016      | <b>–6,5</b> | <b>5,9</b>  | 2,3         | 1,0         | <b>3,8</b>  | 0,1         | 1,4         | 0,3         | 0,0         | –1,0        | <b>–2,4</b> | 1,3         |
| 2017      | 1,1         | 0,7         | 2,5         | <b>–2,3</b> | <b>–3,9</b> | <b>–2,4</b> | –1,6        | 0,9         | –0,2        | –0,6        | 1,7         | 3,8         |
| 2018      | 3,0         | –2,9        | <b>–4,7</b> | 0,6         | 3,6         | –0,6        | 1,5         | 1,9         | 1,4         | 1,0         | 2,2         | –0,7        |
| 2019      | –0,5        | 4,3         | 1,8         | <b>1,5</b>  | 0,2         | 2,4         | <b>–3,6</b> | <b>–1,6</b> | –0,4        | –1,0        | 0,7         | <b>4,5</b>  |
| 2020      | <b>6,4</b>  | 5,5         | 3,4         | –1,0        | –1,6        | 2,0         | –0,9        | –0,4        | 1,3         | <b>2,1</b>  | <b>3,4</b>  | 1,9         |
| 2021      | –0,7        | <b>–6,2</b> | –0,1        | 0,8         | 0,6         | <b>5,1</b>  | <b>2,9</b>  | –0,3        | <b>–2,3</b> | <b>2,1</b>  | 1,3         | <b>–4,2</b> |
| 2022      | 0,3         | 3,7         | 1,2         | –0,8        | –1,6        | 1,2         | 1,7         | <b>3,3</b>  | –1,8        | 1,5         | 0,0         | 0,3         |
| 2023      | 3,4         | 2,3         | 0,8         | 0,8         | 1,7         | –0,3        | –1,6        | 1,7         | 4,0         | <b>–1,7</b> | –1,6        | –2,8        |
| 2024      | –4,0        | –0,2        | 3,0         | –0,2        | 0,4         | 2,9         | 1,4         | 1,7         | <b>5,3</b>  | 1,8         | 2,1         | 1,6         |

Примечание. Жирным выделены максимальные значения положительных и отрицательных отклонений в каждом месяце.

Note. The maximum values of positive and negative deviations in each month are given in bold.

рекорд 2023 г. (табл. 2). Стоит отметить, что все месяцы с мая по декабрь 2024 г. были теплее нормы 1991–2020 гг., при этом летние месяцы со среднемесячной температурой 17,0, 18,5, 16,7 °С были теплее нормы на 1,4–2,9 °С.

Таким образом, погодные условия в 2023 и 2024 гг. существенно отличались как от климатической нормы 1991–2020 гг., так и между собой, что обусловило выраженные расхождения в ледовой фенологии, а также в датах и продолжительности основных гидрологических явлений.

*Ледовая фенология и этапы годового термического цикла*

По данным термокосы установлено, что осенью 2022, 2023 и 2024 гг. водная масса Петрозаводской губы охлаждалась в хорошо перемешанном состоянии, близком к гомотермии. Переход температуры воды через 4 °С в сторону понижения осенью 2022 г. произошел 20 ноября, осенью 2023 г. – 13 ноября (табл. 3). Осенью 2024 г. эту дату установить не удалось, так как на момент поднятия термокосы из озера (7 ноября 2024 г.) температура воды была все еще выше 4 °С; начало предледоставного периода для осени 2024 г. будет определено при следующем извлечении термокосы для снятия данных в 2025 г. Продолжительность предледоставного периода осенью 2022 г. составила 26 суток, осенью 2023 г. – 18 суток, что близко к показателям 2021 г., когда этот период продолжался 15 суток. Наиболее длительным

(83 сут.) предледоставный период был в зимние сезоны 2019/20 гг. (83 сут.), и 2020/21 гг. (43 сут.), когда переход температуры воды через 4 °С в сторону понижения происходил в первой и третьей декадах ноября, а лед установился в начале-конце января следующего года.

В зимний сезон 2022/23 гг. лед установился 16 декабря, что близко к среднемноголетним срокам (18 декабря) [Крупнейшие..., 2015], взлом льда происходил 29 апреля 2023 г., на 10 суток раньше среднемноголетних сроков (9 мая) (табл. 3). Продолжительность ледостава в зимний сезон 2022/23 гг. составила 133 сут., что меньше среднемноголетних значений (144 сут.).

В зимний сезон 2023/24 гг. на фоне холодной погоды октября и ноября лед установился необычно рано – 1 декабря, почти на три недели раньше среднемноголетних сроков. Освобождение акватории ото льда 27–28 апреля 2024 г. произошло также раньше среднемноголетних сроков почти на 2 недели. В этот зимний сезон ледостав продлился 149 суток, что больше среднемноголетней продолжительности за счет более раннего установления льда. В зимние сезоны 2019/20 и 2020/21 ледостав продолжался 51 и 97 сут., что существенно меньше среднемноголетних значений как за счет более позднего установления льда, так и за счет более раннего его взлома. В зимний сезон 2021/22 ледостав продолжался 153 сут., что больше среднемноголетних значений, за счет более раннего установления льда.

Таблица 3. Даты начала и окончания и продолжительность в сутках весенней гомотермии, весеннего термобара, стратификации, биологического лета, осенней гомотермии, предледоставного периода в 2022–2024 гг.

Table 3. Start and end dates and duration in days of spring homothermy, spring thermal bar, stratification, biological summer, autumn homothermy, pre-ice period in 2022–2024

| Год<br>Year | Весенняя<br>гомотермия<br>Spring<br>homothermy | Весенний<br>термобар<br>Spring<br>thermal bar | Стратификация<br>Stratification | Биологическое<br>лето<br>Biological summer | Осенняя<br>гомотермия<br>Autumn<br>homothermy | Предледоставный<br>период<br>Pre-ice period  |
|-------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2019        | н/д<br>no data                                 | н/д<br>no data                                | н/д<br>no data                  | н/д<br>no data                             | н/д<br>no data                                | 9.11.2019–<br>31.01.2020,<br>83 сут. / days  |
| 2020        | 23.03–22.05,<br>60 сут. / days                 | 5–7.05,<br>3 сут. / days                      | 23.05–4.09,<br>104 сут. / days  | 27.05–16.10,<br>142 сут. / days            | 5.09–30.11,<br>55 сут. / days                 | 30.11.2020–<br>11.01.2021,<br>43 сут. / days |
| 2021        | 20.04–11.05,<br>22 сут. / days                 | 11.05,<br>1 сут. / day                        | 12.05–26.08,<br>106 сут. / days | 17.05–6.10,<br>142 сут. / days             | 27.08–22.11,<br>87 сут. / days                | 22.11–7.12,<br>15 сут. / days                |
| 2022        | 3.05–26.05,<br>23 сут. / days                  | 13–19.05,<br>6 сут. / days                    | 27.05–31.08,<br>96 сут. / days  | 2.06–30.09,<br>120 сут. / days             | 1.09–20.11,<br>80 сут. / days                 | 20.11–16.12,<br>26 сут. / days               |
| 2023        | 29.04–11.05,<br>12 сут. / days                 | 11.05,<br>1 сут. / day                        | 11.05–6.10,<br>148 сут. / days  | 23.05–7.10,<br>137 сут. / days             | 7.10–13.11,<br>37 сут. / days                 | 13.11–1.12,<br>18 сут. / days                |
| 2024        | 28.04–17.05,<br>19 сут. / days                 | 17.05,<br>1 сут. / day                        | 17.05–7.10,<br>143 сут. / days  | 30.05–7.10,<br>130 сут. / days             | 8.10–н/д /<br>no data                         | н/д<br>no data                               |

Весенний подледный прогрев и подледное конвективное перемешивание начались в 2023 г. в середине марта, в 2024 г. – с первых чисел марта, что могло быть связано с более теплыми погодными условиями и солнечной погодой. В предыдущие годы подледное нагревание и конвективное перемешивание также начинались в период с конца февраля до второй декады марта [Bogdanov et al., 2019]. В 2023 г. в связи с тем, что в середине марта температура по всему водному столбу была очень низкой (среднее значение 0,3 °C), конвективное перемешивание достигло дна довольно быстро, за 10 суток, к 24 марта, и затем водный столб нагревался в полностью перемешанном состоянии еще более месяца – до 27–28 апреля. Весной 2024 г. также происходило довольно быстрое заглубление нижней границы конвективного слоя (на 0,5–0,9 м в дневные часы), что соизмеримо со скоростями, наблюдаемыми в предыдущие годы в период конвекции в Петрозаводской губе Онежского озера [Bogdanov et al., 2019], а также в других глубоких водоемах [Kirillin et al., 2012].

К концу ледостава температура конвективного слоя повысилась вследствие радиационного нагревания до 1,7 °C весной 2023 г. и до 1,0 °C весной 2024 г. Весенняя подледная конвекция в 2023 г. продолжалась 46 суток, в 2024 г. – около 60 суток, в предыдущие годы измерений на автономной станции этот период длился 1,0–1,5 месяца.

Радиационное нагревание покрытых льдом водоемов играет важнейшую роль в термическом режиме озер в конце периода ледостава [Kirillin et al., 2012]. Весеннее подледное перемешивание регулирует ранневесеннее развитие фитопланктона, так как восходящие конвективные токи доставляют питательные вещества в фотическую зону и удерживают в ее пределах неспособные к самостоятельному передвижению виды фитопланктона [Пальшин и др., 2019], а нисходящие токи могут переносить клетки водорослей за пределы фотической зоны, что сдерживает их развитие [Калинина и др., 2024].

После освобождения ото льда весной 2023 и 2024 гг., так же как в 2021 и 2022 гг., водная толща Петрозаводской губы находилась в перемешанном состоянии в течение 2–3 недель под действием ветра и радиационно-генерированной конвекции. Такой тип конвекции наблюдается в покрытых льдом озерах [Kirillin et al., 2012], а также в озерах в условиях открытой воды при повышении температуры воды в диапазоне от 0 до 3,98 °C (температура максимальной плотности пресной воды). Наиболее

длительный период весеннего перемешивания (60 сут.) наблюдался весной 2020 г., когда лед разрушился 22 марта, а стратификация установилась лишь 23 мая.

Прохождение термобара в 2023 (11 мая) и в 2024 (17 мая) годах произошло раньше среднемноголетних сроков (конец мая), как и в предыдущие годы измерений на автономной станции (табл. 3). Можно заключить, что в последние годы на фоне потепления регионального климата характерно более раннее прохождение термобара по акватории губы по сравнению со среднемноголетними сроками.

После прохождения термобара весной 2023 и 2024 гг. на фоне теплой маловетреной погоды в течение одного дня произошло формирование стратификации, как и весной 2021 г. [Здоровеннова и др., 2023]. Весной 2016, 2020 и 2022 гг. [Здоровеннова и др., 2023] на фоне ветреной и прохладной погоды водная толща губы оставалась в перемешанном состоянии при температуре 4–6 °C еще 7–17 суток.

Таким образом, период весеннего перемешивания в условиях открытой воды (от взлома льда до установления стратификации) продолжался в 2023 и 2024 гг. две и три недели соответственно, что близко к значениям предыдущих лет наблюдений на станции – 2–4 недели в 2016, 2021 и 2022 г. Аномально продолжительным был этот период весной 2020 г. (более двух месяцев), когда стратификация установилась лишь 23 мая.

В период весеннего перемешивания в условиях открытой воды происходят важные процессы, оказывающие влияние на функционирование озерной экосистемы: аэрация водной толщи, перенос питательных веществ в фотическую зону из придонного слоя, что способствует ранневесеннему развитию фитопланктона. Оценка изменений продолжительности этого периода под влиянием изменений регионального климата является важной задачей.

Продолжительность стратификации в 2023 (148 сут.) и 2024 (143 сут.) годах была заметно больше, чем в предыдущие годы измерений (96–106 сут., см. табл. 3), главным образом за счет аномально теплых погодных условий сентября.

На этапе летней стратификации 2023 и 2024 гг. разница температуры по водному столбу периодически увеличивалась до 10–14 °C, как и в предыдущие годы измерений на автономной станции (рис. 2). Однако в периоды похолоданий, которые были обусловлены прохождением циклонов, стратификация заметно ослабевала и разница температур верхнего и придонного слоев уменьшалась

до 0,5–1,0 °С, прежде всего за счет резкого понижения температуры верхнего слоя воды. Интересно, что во второй половине июля – сентябре периодически наблюдались резкие повышения температуры придонного слоя и возврат к предыдущим значениям через несколько дней. Наиболее часто это происходило летом 2020, 2023 и 2024 гг. (рис. 2, а, г, д). Предположительно, такой характер изменения температуры был обусловлен опусканием

воды из прогретого верхнего слоя в нижележащие слои при конвергенции течений.

Летом 2024 г. температура придонного слоя превышала 15 °С с 29 июля по 1 августа, 3–11, 14–16, 22–23 августа, 10–11, 15–19 и 23–25 сентября 2024 г. Температура в этом слое превышала 10 °С практически непрерывно с 23 июля по 23 августа и со 2 по 29 сентября 2024 г., то есть более 53 суток. С чем была связана эта ситуация, пока установить не удалось.

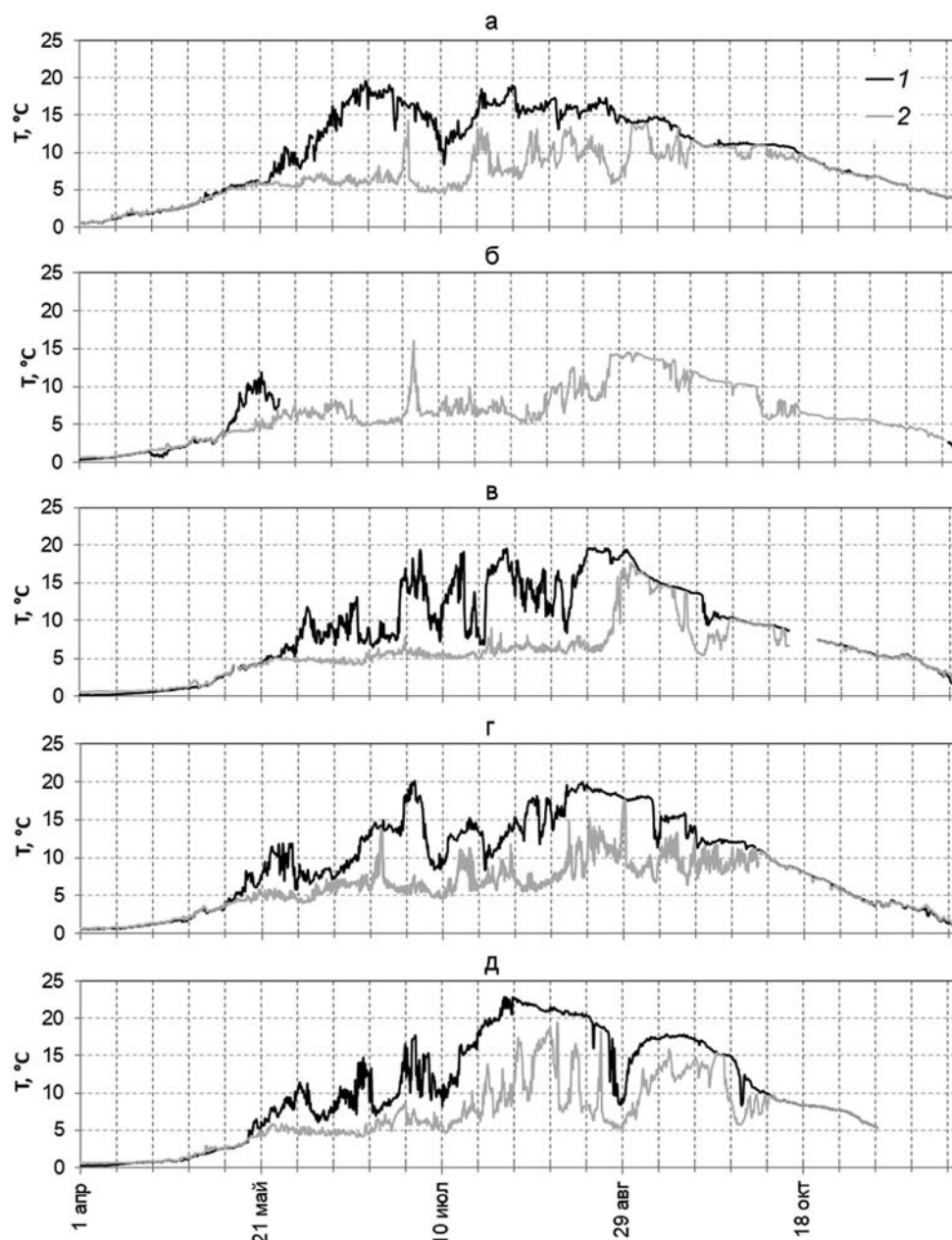


Рис. 2. Температура воды верхнего (1) и придонного (2) слоев Петрозаводской губы Онежского озера в период с 1 апреля по 30 ноября в 2020 (а), 2021 (б), 2022 (в), 2023 (г), 2024 (д) гг.

Fig. 2. Water temperature of the upper (1) and bottom (2) layers of Petrozavodsk Bay of Lake Onego from April 1 to November 30 in 2020 (a), 2021 (б), 2022 (в), 2023 (г), 2024 (д)

Возможная причина – особенности водообмена с открытой частью Онежского озера. Периодические эпизоды кратковременного повышения температуры воды придонного слоя отмечались и в предыдущие годы измерений на автономной станции. Например, в период с 30 июня по 3 июля 2021 г. происходило повышение температуры придонного слоя от 5,5 до 16 °С, затем к 5 июля температура понизилась до 6,24 °С. Прохладным летом 2020 г. такие эпизоды повторялись довольно часто, а в жаркие летние месяцы 2021 и 2022 гг. наблюдались заметно реже. Возможно, такой характер изменения температуры воды в придонном слое мог быть связан с опусканием теплой воды из поверхностного слоя вследствие конвергенции течений. Но летом 2024 г. периоды повышения температуры придонного слоя были заметно более длительными, чем в предыдущие годы. Столь нетипично частые повышения температуры придонного слоя воды могут оказывать влияние на условия обитания бентосного сообщества Петрозаводской губы.

Период уменьшения теплосодержания столба воды (этап осеннего охлаждения) на акватории Петрозаводской губы продолжается с середины июля до конца августа. Разрушение сезонного термоклина и полное перемешивание водной толщи озера происходит в разные годы в период с последних чисел августа до начала октября (табл. 3). Период осенней гомотермии до перехода температуры воды через 4 °С в сторону понижения продолжается в разные годы 37–87 сут. (см. табл. 3). На этом этапе водная толща полностью перемешана под совместным действием поверхностного охлаждения и ветрового воздействия. На этапе охлаждения водной толщи в диапазоне температур ниже 4 °С (предледоставный период) перемешивание происходит только в результате ветрового воздействия.

Период «биологического» лета в 2023 и 2024 гг. продолжался 137 и 130 сут. соответственно. В 2020 и 2021 гг. этот период длился 142 сут. и лишь 120 сут. в 2022 г., что связано с холодными температурными условиями мая и сентября в этот год. Переход температуры поверхностного слоя воды через 10 °С в сторону повышения наблюдался в годы измерений с 17 мая по 1 июня, в сторону понижения – с конца сентября до второй декады октября. Точно определить продолжительность этого периода для лета 2021 г. не представляется возможным, так как датчик, располагавшийся в верхнем слое озера, не работал и измерения проводились только на придонном датчике. Но если ориентироваться

на температуру воздуха и показания придонного датчика температуры, то температура верхнего слоя озера могла превышать 10 °С в период с начала июня до начала октября, то есть более 120 суток.

Увеличение продолжительности периода с температурой воды выше 10 °С на фоне потепления регионального климата установлено для ряда озер Карелии [Ефремова и др., 2016]. По измерениям на автономной станции пока нельзя утверждать о явных тенденциях изменчивости продолжительности этого периода, можно говорить лишь о том, что она существенно меняется в разные годы. Стоит отметить, что важную роль в продолжительности биологического лета играют температурные условия не только летних месяцев, но также весенних и осенних.

## Заключение

В 2023 и 2024 гг. даты начала и продолжительность этапов годового термического цикла на акватории Петрозаводской губы Онежского озера заметно отличались как от многолетних значений этих показателей, так и от их значений в предыдущие годы измерений на автономной станции, что было связано с изменениями погодных условий. В зимние сезоны 2022/23 и 2023/24 гг. начало ледостава происходило в более ранние сроки относительно многолетних, окончание ледостава – также в более ранние сроки, продолжительность ледостава превышала среднемноголетнюю в зимний сезон 2023/24 гг. с более холодными погодными условиями. Сравнение пяти последовательных зимних сезонов измерений на автономной станции показало, что на фоне контрастных погодных условий осени, зимы и весны продолжительность предледоставного периода (15–83 сут.), даты установления льда (1 декабря – 31 января) и освобождения ото льда (22 марта – 3 мая) изменялись в широких пределах. Выявлена несколько бóльшая изменчивость дат начала ледостава (2 месяца) по сравнению с датами взлома льда (1,5 месяца). Продолжительность ледостава (51–153 сут.) изменялась от 1,5 до 5 месяцев.

Продолжительность периодов весеннего перемешивания в 2023 и 2024 гг. (12 и 19 сут.) была меньше, чем в предыдущие годы (22–60 сут.), а продолжительность стратификации (148 и 143 сут.) – на месяц больше, чем в другие годы (96–106 сут.).

Длительные периоды нетипично высокой температуры воды придонного слоя Петрозаводской губы летом 2024 г. (более 1,5 мес.)

могут оказывать негативное влияние на условия обитания бентосного сообщества Петрозаводской губы.

Столь выраженная изменчивость ледовой фенологии и термического режима залива крупного озера на фоне изменений регионального климата очевидно влияет на функционирование его экосистемы, что требует продолжения измерений в Петрозаводской губе и организации мониторинговых измерений в других заливах Онежского озера, в первую очередь в Кондопожской губе, испытывающей значительное антропогенное воздействие.

## Литература

- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет, 2023. 104 с.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Белашев Б. З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 228–238. doi: 10.7868/S0321059616020024
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Кравченкова Т. Г., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Богданов С. Р., Смирнов С. И. Влияние изменений климата на термический и ледовый режим озер Карелии по данным многолетних наблюдений (1950–2021 гг.) // Лимнология в России: Тез. докл. Всерос. науч. конф. (Санкт-Петербург, 12–14 февраля 2024 г.). СПб.: РАН, 2024. С. 160–161. doi: 10.12731/978-5-907645-54-7
- Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В. Сезонная и межгодовая изменчивость температуры воды в Петрозаводской губе Онежского озера по круглогодичным измерениям на автономной станции // Известия РГО. 2023. Т. 155, № 3-4. С. 47–61. doi: 10.31857/S0869607123030126
- Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Павлейчик В. М., Падалко Ю. А. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019–2020 годов // Известия РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85, № 6. С. 888–899. doi: 10.31857/S2587556621060078
- Калинкина Н. М., Смирнова В. С., Сластина Ю. Л., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Зобков М. Б., Теканова Е. В., Назарова Л. Е. Развитие зимнего фитопланктона Онежского озера в зависимости от физико-химических условий среды // Известия РГО. 2024. Т. 156, № 4. С. 358–374. doi: 10.31857/S0869607124040084
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
- Назарова Л. Е. Современные характеристики температурного режима территории Карелии // II Лаверовские чтения. Арктика: актуальные проблемы и вызовы: Сб. науч. мат-лов Всерос. конф. с междунар. участием. Архангельск, 2023. С. 73–75.
- Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Ефремова Т. В., Гавриленко Г. Г., Терзhevik А. Ю. Влияние весенней подледной освещенности и конвективного перемешивания на распределение хлорофилла «а» в малом мезотрофном озере // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 3. С. 259–269. doi: 10.31857/S0321-0596463259-269
- Расписание погоды. Rp5.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 15.02.2025).
- Bogdanov S., Zdrovennova G., Volkov S., Zdrovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions // Inland Waters. 2019. Vol. 9(2). P. 177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655
- Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impact on the watersheds of lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // Inland Waters. 2019. Vol. 9(2). P. 130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355
- Gudasz C., Bastviken D., Steger K., Premke K., Sobek S., Tranvik L. J. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments // Nature. 2010. Vol. 466(7305). P. 478–481. doi: 10.1038/nature09186
- Hampton S. E., Galloway A. W. E., Powers S. M. et al. Ecology under lake ice // Ecol. Lett. 2017. Vol. 20. P. 98–111. doi: 10.1111/ele.12699
- Hampton S. E., Powers S. M., Dugan H. A., Knoll L. B., McMeans B. C., Meyer M. F., O'Reilly C. M., Ozersky T., Sharma S., Barrett D. C., Chandra S., Jansen J., McClure R. P., Rautio M., Weyhenmeyer G. A., Yang X. Environmental and societal consequences of winter ice loss from lakes // Sciences. 2024. Vol. 386. Art. 6718. doi: 10.1126/science.adl321
- IPCC. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Электронный ресурс]. Cambridge University Press, 2021. URL: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book> (дата обращения: 26.02.2025).
- Jansen J., MacIntyre S., Barrett D.C., Chin Y.-P., Cortés A., Forrest A. L., Hryciak A. R., Martin R., McMeans B. C., Rautio M., Schwefel R. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2021. Vol. 126. e2020JG006237. doi: 10.1029/2020JG006237
- Kirillin G., Bernhardt J., Engelhardt C., Leppäranta M., Terzhevik A., Efremova T., Palshin N., Zdrovennova G., Zdrovennov R., Golosov S., Granin N., Shershtyankin P. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquat. Sci. 2012. Vol. 74(4). P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y
- Naderian D., Noori R., Bateni S. M., Jun C., Kim D., Shahmohammad M., Alizadeh F., Kianmehr P., Woolway R. I. Pivotal role of snow depth, local atmospheric conditions, and large-scale climate signals on ice thinning in Finnish lakes // Sci. Total Environ. 2025. Vol. 966. Art. 178715. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178715
- O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around

the globe // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42(24). P. 10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235

Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., Oreilly C., Oliver S., Batt R. D., Magee M. R., Straile D., Weyhenmeyer G., Winslow L., Woolway R. I. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nat. Clim. Change*. 2019. Vol. 9(3). P. 227–231. doi: 10.1038/s41558-018-0393-5

Thackeray S. J., Jones I. D., Maberly S. C. Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: Species-specific responses to nutrient enrichment and climatic change. // *J. Ecol.* 2008. Vol. 96(3). P. 523–535. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01355.x

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdrovennova G., Bansal Sh., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Erina O., Fedorova I., Fischer Ja. M., Grinberga L., Grossart H. P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier Ja., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak Ja. A., Sharma S., Wain D., Zdrovennov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming // *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. Art. 4974. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

Winder M., Schindler D. E. Climate effects on the phenology of lake processes // *Glob. Change Biol.* 2004. Vol. 10(11). P. 1844–1856.

Woolway R. I., Merchant C. J. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change // *Nat. Geosci.* 2019. Vol. 12(4). P. 271–276. doi: 10.1038/s41561-019-0322-x

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

Zhou S., Long H., Chen W., Qiu C., Zhang C., Xing H., Zhang J., Cheng L., Zhao C., Cheng J., Ciais P. Temperature seasonality regulates organic carbon burial in lake // *Nat. Commun.* 2025. Vol. 16. Art. 1049. doi: 10.1038/s41467-025-56399-4

## References

Bogdanov S., Zdrovennova G., Volkov S., Zdrovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions. *Inland Waters*. 2019;9(2):177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655

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

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Kravchenkova T. G., Zdrovennov R. E., Zdrovennova G. E., Bogdanov S. R., Smirnov S. I. The impact of climate change on the thermal and ice regime of lakes in Karelia based on long-term observations (1950–2021). *Limnologiya v Rossii: Tez. dokl. Vseros. nauch. konf. (Sankt-Peterburg, 12–14 fevralya 2024 g.) = Limnology in Russia: Proceed. of the All-Russian scientific conf. (St. Petersburg, Feb. 12–14, 2024)*. St. Petersburg; 2024. P. 160–161. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907645-54-7

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impact on the watersheds of lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters*. 2019;9(2):130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Gudas C., Bastviken D., Steger K., Premke K., Sobek S., Tranvik L. J. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*. 2010; 466(7305):478–481. doi: 10.1038/nature09186

Hampton S. E., Galloway A. W. E., Powers S. M. et al. Ecology under lake ice. *Ecol. Lett.* 2017;20:98–111. doi: 10.1111/ele.12699

Hampton S. E., Powers S. M., Dugan H. A., Knoll L. B., McMeans B. C., Meyer M. F., O'Reilly C. M., Ozersky T., Sharma S., Barrett D. C., Chandra S., Jansen J., McClure R. P., Rautio M., Weyhenmeyer G. A., Yang X. Environmental and societal consequences of winter ice loss from lakes. *Sciences*. 2024;386:6718. doi: 10.1126/science.adl321

IPCC. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2021. URL: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book> (accessed: 26.02.2025).

Jansen J., MacIntyre S., Barrett D. C., Chin Y.-P., Cortés A., Forrest A. L., Hryciuk A. R., Martin R., McMeans B. C., Rautio M., Schwefel R. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2021;126:e2020JG006237. doi: 10.1029/2020JG006237

Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Pavleichik V. M., Padalko Yu. A. Response of the Lake Onego ecosystem in the spring–summer period to anomaly high air temperature in winter 2019/2020. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Izvestiya RAN. Geographical Series*. 2021;85(6):888–899. (In Russ.). doi: 10.31857/S2587556621060078

Kalinkina N. M., Smirnova V. S., Slastina Yu. L., Zdrovennov R. E., Zdrovennova G. E., Zobkov M. B., Tekanova E. V., Nazarova L. E. Development of winter phytoplankton of Lake Onego in connection with physical and chemical conditions of the environment. *Izvestiya RGO = Proceedings of the RGS*. 2024;156(4): 358–374. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869607124040084

Kirillin G., Bernhardt J., Engelhardt C., Leppäranta M., Terzhevik A., Efremova T., Palshin N., Zdrovennova G., Zdrovennov R., Golosov S., Granin N., Sherstyankin P. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquat. Sci.* 2012;74(4):659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Naderian D., Noori R., Bateni S. M., Jun C., Kim D., Shahmohammad M., Alizadeh F., Kianmehr P., Woolway R. I. Pivotal role of snow depth, local atmospheric conditions, and large-scale climate signals on ice thinning in Finnish lakes. *Sci. Total Environ.* 2025;966:178715. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178715

Nazarova L. E. Current characteristics of the temperature regime on the territory of Karelia. *Il Laverovskie chteniya. Arktika: aktual'nye problemy i vyzovy: Sb. nauch. mat-lov Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem = Il Laverov readings. The Arctic: current problems*

and challenges: *Proceed. of the All-Russian conf. with int. part.* Arkhangel'sk; 2023. P. 73–75. (In Russ.)

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

Palshin N. I., Zdorovenнова G. E., Zdorovennov R. E., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhhevik A. Y. Effect of under-ice light intensity and convective mixing on chlorophyll a distribution in a small mesotrophic lake. *Water Resources.* 2019;46(3):384–394. doi: 10.1134/S0097807819030175

Report on climate features in the Russian Federation for 2022. Moscow: Roshydromet; 2023. 104 p. (In Russ.)

Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., Oreilly C., Oliver S., Batt R. D., Magee M. R., Straile D., Weyhenmeyer G., Winslow L., Woolway R. I. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world. *Nat. Clim. Change.* 2019;9(3):227–231. doi: 10.1038/s41558-018-0393-5

Thackeray S. J., Jones I. D., Maberly S. C. Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: Species-specific responses to nutrient enrichment and climatic change. *J. Ecol.* 2008;96(3):523–535. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01355.x

Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)

Weather schedule. Rp5.ru. URL: <https://rp5.ru/> (accessed: 15.02.2025).

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenнова G., Bansal Sh., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Eri-na O., Fedorova I., Fischer Ja. M., Grinberga L., Gros-sart H. P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier Ja., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak Ja. A., Sharma S., Wain D., Zdorovennov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nat. Commun.* 2022;13:4974. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

Winder M., Schindler D. E. Climate effects on the phenology of lake processes. *Glob. Change Biol.* 2004;10(11):1844–1856.

Woolway R. I., Merchant C. J. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nat. Geosci.* 2019;12(4):271–276. doi: 10.1038/s41561-019-0322-x

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

Zdorovenнова G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N. I., Efremova T. V. Seasonal and inter-annual variability of water temperature in Petrozavodsk Bay of Lake Onega. *Izvestiya RGO = Proceedings of the RGS.* 2023;155(3-4):47–61. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869607123030126

Zhou S., Long H., Chen W., Qiu C., Zhang C., Xing H., Zhang J., Cheng L., Zhao C., Cheng J., Ciais P. Temperature seasonality regulates organic carbon burial in lake. *Nat. Commun.* 2025;16:1049. doi: 10.1038/s41467-025-56399-4

Поступила в редакцию / received: 28.05.2025; принята к публикации / accepted: 11.07.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Здорovenнова Галина Эдуардовна

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник,  
руководитель лаборатории гидрофизики

e-mail: [zdorovennova@gmail.com](mailto:zdorovennova@gmail.com)

### Здорovenнов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: [romga74@gmail.com](mailto:romga74@gmail.com)

### Новикова Юлия Сергеевна

аспирант, младший научный сотрудник

e-mail: [novyuliana@gmail.com](mailto:novyuliana@gmail.com)

### Ефремова Татьяна Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: [efremova@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:efremova@nwpi.krc.karelia.ru)

## CONTRIBUTORS:

### Zdorovenнова, Galina

Cand. Sci. (Geog.), Leading Researcher,  
Head of Hydrophysics Laboratory

### Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

### Novikova, Iuliia

Doctoral Student, Junior Researcher

### Efremova, Tatiana

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

УДК 551.465.5.551.466

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСКОЙ СРЕДЫ В БУХТЕ БЛАГОПОЛУЧИЯ (СОЛОВЕЦКИЕ ОСТРОВА, БЕЛОЕ МОРЕ): ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АПРЕЛЕ 2025 ГОДА

Р. Э. Здорovenнов, Г. Э. Здорovenнова\*, А. В. Толстиков,  
Ю. С. Новикова, С. Р. Богданов, Ю. Н. Лукина

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

\* zdorovennova@gmail.com

В бухте Благополучия (Соловецкие острова, Белое море) в рамках темы НИР «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» (FMEN 2024-0016) 5–7 апреля 2025 г. проведены гидрофизические измерения, направленные на выявление особенностей снежно-ледяного покрова, изменений температуры и солёности, кислородных условий, оптических свойств воды в приливном цикле в период ледостава. Измерения включали: 1) ледовую пространственную съёмку; 2) установку вблизи места сброса сточных вод автономной станции для измерения температуры воды, давления и растворённого кислорода в приливном цикле; 3) пространственную съёмку температуры, солёности, растворённого кислорода, потоков фотосинтетической активной солнечной радиации на сетке станций на полной и малой воде. Установлено, что сточные воды с температурой  $+0,3...+0,4$  °C и солёностью 0,3–0,5 ‰ распространяются по акватории бухты Благополучия подо льдом на расстояние более 300 м от точки сброса. Толщина слоя сточных вод на всех станциях на полной воде уменьшается на 0,10–0,15 м по сравнению с малой водой. Ниже слоя сточных вод на всех станциях определен слой смешения толщиной несколько десятков см, в котором происходит понижение температуры воды до отрицательных значений и повышение солёности до 23 ‰. Ниже слоя смешения на всех станциях залегает слой морских вод с температурой  $-1,1...-1,2$  °C и солёностью 27,4 ‰. Установлено, что содержание кислорода в слое сточных вод (60–70 %) заметно ниже, чем вне этого слоя (90–130 %). Резкое уменьшение потока солнечной радиации в слое сточных вод и слое смешения определяет низкую освещённость водного столба с близкими к нулю значениями потока солнечной радиации глубже 2–3 м. Практически на всех станциях обнаружено существенное (в среднем около 30 %) уменьшение коэффициента экстинкции на полной воде по сравнению с малой водой, что указывает на частичный вынос сточных вод морским приливом.

Ключевые слова: Белое море; Соловецкие острова; сточные воды; гидрофизические характеристики; температура воды; лед; потоки солнечной радиации; растворённый кислород; приливной цикл

Для цитирования: Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Толstиков А. В., Новикова Ю. С., Богданов С. Р., Лукина Ю. Н. Гидрофизические характеристики морской среды в бухте Благополучия (Соловецкие острова, Белое море): оценка на основе экспедиционных исследований в апреле 2025 года // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 39–56. doi: 10.17076/lim2118

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

**R. E. Zdorovennov, G. E. Zdorovennova\*, A. V. Tolstikov, I. S. Novikova, S. R. Bogdanov, Yu. N. Lukina. HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE MARINE ENVIRONMENT IN BLAGOPOLUCHIYA BAY (SOLOVETSKY ISLANDS, WHITE SEA): AN ASSESSMENT BASED ON FIELDWORK IN APRIL 2025**

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

As part of the research theme “State of the White Sea Coastal Ecosystem within the Solovetsky Archipelago” (FMEN 2024-0016), measurements were carried out in Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands, White Sea) on April 5-7, 2025 to identify the characteristics of the snow-ice cover, changes in temperature and salinity, oxygen conditions, and optical properties of water through the tidal cycle during the ice-covered period. The measurements included: (1) ice spatial survey; (2) installation of stand-alone stations for measuring water temperature, pressure and dissolved oxygen at the wastewater discharge site through the tidal cycle; (3) spatial survey of temperature, salinity, dissolved oxygen, and fluxes of photosynthetic active solar radiation over a grid of stations at high and low water. It was found that wastewater with a temperature of  $+0.3...+0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  and a salinity of  $0.3\text{--}0.5\text{ }_{\text{‰}}$  spreads across Blagopoluchiya Bay under ice over a distance of more than 300 m from the discharge point. The wastewater layer at all stations was 0.10–0.15 m thinner at high tide compared with low tide. Below the wastewater layer, there was a mixing layer several tens of cm thick at all stations, in which the water temperature fell to negative values and the salinity rose to 23 ‰. The mixing layer was underlain by a layer of seawater with a temperature of  $-1.1...-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  and a salinity of 27.4‰. It was found that the oxygen content in the wastewater (60–70 %) was noticeably lower than outside this layer (90–130 %). A sharp decrease in the solar radiation flux in the wastewater layer and the mixing layer is responsible for the poor illumination of the water column, with solar radiation fluxes close to zero at depths below 2–3 m. At almost all stations, there occurred a significant (approx. 30 % on average) decrease in the extinction coefficient at high tide versus low tide, indicating partial removal of wastewater by the sea tide.

**Keywords:** White Sea; Solovetsky Islands; wastewater; hydrophysical characteristics; water temperature; ice; solar radiation fluxes; dissolved oxygen; tidal cycle

For citation: Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E., Tolstikov A. V., Novikova I. S., Bogdanov S. R., Lukina Yu. N. Hydrophysical characteristics of the marine environment in Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands, White Sea): an assessment based on fieldwork in April 2025. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 39–56. doi: 10.17076/lim2118

**Funding.** The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

## Введение

В 2024 г. сотрудники нескольких институтов Карельского научного центра РАН в рамках темы НИР «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» (FMEN 2024-0016) начали комплексные

междисциплинарные исследования прибрежной акватории бухты Благополучия Соловецкого архипелага Белого моря (рис. 1), экосистема которой испытывает выраженное антропогенное воздействие как в результате возрастающего потока туристов и паломников, так и вследствие хозяйственной деятельности МО

«Сельское поселение Соловецкое». Основные источники загрязнения бухты – практически неочищенные сточные воды поселка, рыболовство, водорослеводство, судоходство, маломерные суда. Все эти и другие факторы (шумовое загрязнение, накопление частиц микропластика и др.) могут привести к заметному ухудшению среды обитания уникальных видов морских животных. Уязвимость северных морских экосистем обосновывает актуальность исследований и необходимость организации мониторинга прибрежной зоны Соловецких островов для своевременного выявления критических изменений водных экосистем.

Экспедиционные исследования, проведенные в августе 2024 г. сотрудниками Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, включали батиметрическую съемку акватории,

отбор проб воды на ключевых станциях, гидрофизические измерения в течение нескольких дней на автономных станциях, зондирования на станциях продольного разреза на разных фазах приливного цикла. На ключевых станциях (в кутовой и мористой частях акватории, вблизи точки сброса сточных вод и в 250–1000 м от нее [Лукина и др., 2025, рис. 1]) выполняли зондирования показателей по вертикали (температура, электропроводность, мутность воды, хлорофилл *a*, потоки солнечной радиации) и осуществляли отбор проб воды для химических и биологических анализов. Анализ полученных данных позволил выявить особенности термогидродинамических и химико-биологических процессов в бухте в период открытой воды [Лукина и др., 2025; Калинкина и др., в печати].



Рис. 1. Положение бухты Благополучия на о. Большой Соловецкий. Врезка: схема расположения станций измерений (AC – автономная станция) 5–7 апреля 2025 г. Стрелкой обозначено место сброса сточных вод в бухту

Fig. 1. The position of Blagopoluchiya Bay on Bolshoy Solovetsky Island. Inset: scheme of the measurement stations (AC – autonomous station) on April 5–7, 2025. The arrow indicates the location of the wastewater discharge into the bay

В частности, установлено, что наличие островов, особенности береговой линии и батиметрии сглаживают влияние приливной волны, за счет чего скорости течений на акватории бухты невелики и не превышают 10–15 см/с [Лукина и др., 2025]. Показано, что потенциально возможный перенос примеси по акватории бухты может достигать сотен метров, однако направления этого переноса периодически меняются. Обнаружены повышенные значения мутности в придонных слоях локальных углублений дна, что свидетельствует о возможном накоплении загрязняющих веществ, поступающих в бухту. Установлено, что в настоящее время по содержанию общего фосфора воды бухты можно отнести к высокоэвтрофным (вблизи точки поступления сточных вод концентрация общего фосфора превышала 200–600 мкг/л на разных фазах приливного цикла, в других районах бухты достигала 22–85 мкг/л). Ретроспективный анализ показал, что за 30 лет произошло 4-кратное увеличение концентрации общего фосфора в открытой части бухты [Калинкина и др., в печати].

Условия среды обитания бухты формируются под влиянием приливной циркуляции и смешения морских и пресных неочищенных сточных вод МО «Сельское поселение Соловецкое», поступающих в кутовую часть бухты непрерывно в течение года (52 тыс. м<sup>3</sup> в год) [Стратегия..., 2013].

Ранее оценка гидрофизических параметров среды обитания бухты Благополучия в период ледостава не проводилась. Зимой вдоль береговой полосы Соловецких островов образуется припайный лед шириной несколько километров, но в проливах Западная и Восточная Соловецкая Салма сплошного ледяного покрова нет в силу мощной динамики течений. Ледяной покров в акватории бухты Благополучия обычно формируется в ноябре, разрушается в мае. В период ледостава судоходство на акватории бухты не осуществляется.

Сплошной снежно-ледяной покров может существенно менять характер распространения сточных вод по акватории бухты, ограничивая ветровое воздействие, оказывает влияние на температурные и кислородные условия водной среды, существенно ограничивает поступление солнечной радиации в водную толщу. Весной, по мере таяния снега и роста потока солнечной радиации, проходящего сквозь лед, увеличивается подледная освещенность, при этом может происходить активизация планктонного сообщества. Получение новых сведений об условиях среды обитания гидробионтов в этот период становится важной задачей для понимания годового цикла функционирования

водной экосистемы бухты и обоснования ограничений хозяйственной деятельности.

Для экспедиционных исследований был выбран апрель, когда ощутимо увеличивается продолжительность светового дня (более 14 ч начиная с 4–5 апреля) по сравнению с зимними месяцами (3,5–6 ч в декабре–январе, 7–10 ч в феврале). Учитывая сроки ледовых явлений в прибрежной зоне Соловецких островов, в начале апреля лед в бухте все еще достаточно крепкий для обеспечения безопасности работ.

Для понимания того, как меняются условия среды обитания в приливном цикле в покрытой сплошным льдом бухте, необходимы измерения на автономных станциях в течение нескольких суток и зондирования на сетке станций на разных фазах приливного цикла. Ранее такие измерения в зимний период на акватории бухты не проводились. Для анализа синоптических и сезонных изменений среды обитания необходимы более длительные измерения, которые планируются на период ледостава в 2026 г.

Для уточнения термического, гидродинамического, кислородного и светового режимов бухты в период ледостава проведены исследования в апреле 2025 г., которые включали измерения толщины снежно-ледяного покрова, потоков солнечной радиации в толще воды, течений, температуры и солености воды, содержания растворенного кислорода в воде в приливном цикле. Измерения выполнялись на автономных станциях в течение нескольких суток и путем зондирования водной толщи на сетке станций на разных фазах приливного цикла. В рамках палеографических исследований были отобраны колонки донных отложений и пробы воды для химических анализов.

В данной статье приведены описания методик гидрофизических исследований и предварительные результаты изучения ледового, термического, светового и кислородного режимов бухты в приливном цикле. Особенности течений в бухте Благополучия и результаты анализов проб воды и колонок донных отложений будут обобщены в следующих публикациях.

Цель работы – выявление особенностей термических, кислородных и световых условий в бухте Благополучия Соловецких островов Белого моря в приливном цикле в период ледостава по данным измерений в апреле 2025 г.

## Материалы и методы

Бухта Благополучия (гавань Благополучия) расположена на западном берегу о. Большой Соловецкий (рис. 1), непосредственно рядом с Соловецким монастырем. Береговая полоса

бухты сильно изрезана небольшими губами и мысами. Глубины здесь меняются от 1–2 м в вершине бухты (рядом с монастырем) до 10 м на выходе из нее. В центральной части акватории бухты, где находится судовой ход, глубины достигают 5–6 м. Высота прилива меньше 1 м, скорость приливных течений в районе архипелага может достигать 1,8 м/с, однако вне узких проливов не превышает 0,5 м/с [Лоция..., 1983]. В самой бухте Благополучия течения слабые (10–15 см/с) [Лукина и др., 2025].

Белое море играет ключевую роль в формировании климата Соловецкого архипелага. Благодаря смягчающему влиянию моря Соловки находятся в сравнительно благоприятных температурных условиях, здесь мягкая продолжительная зима и короткое прохладное лето. Климат умеренный морской, переходный к континентальному, по среднегодовым характеристикам более теплый, чем на материке [Гидрометеорология..., 1991]. Влияние циклонов ощущается в течение всего года; для лета характерны частые вторжения арктических воздушных масс, несущих солнечную, но холодную погоду. Средняя годовая скорость ветра составляет 6,8 м/с, с марта по август на архипелаге преобладают холодные северо-восточные ветра, с сентября по февраль – юго-западные [Лоция..., 1983; Гидрометеорология..., 1991]. Климат в Беломорском регионе меняется: для ряда метеостанций водосбора Белого моря выявлен рост среднегодовой температуры воздуха на 0,8–1,2 °С в 1991–2020 гг. по сравнению с климатической нормой 1961–1990 гг. с наибольшим изменением в январе (превышение нормы на 1,6–2,9 °С), увеличение сумм осадков, сокращение на два месяца периода выпадения твердых осадков [Филатов и др., 2022].

**Методы измерений.** В период с 5 по 7 апреля 2025 г. измерения проведены на 9 станциях (рис. 1). В таблице 1 приводятся периоды и виды измерений.

Измерения толщины снега и льда и описание слоев льда выполнены 5 апреля на ст. S-4 и 6 апреля на всех остальных станциях. Для получения керна льда делали 4 лунки ледобуром на расстоянии 30–40 см, затем лед между лунками пропиливали ледовой пилой. КERN льда извлекали из лунки и проводили измерение слоев льда.

Вблизи точки сброса сточных вод (рис. 1) 5–7 апреля проводились измерения давления, температуры воды и содержания растворенного кислорода (РК) на автономной станции (АС). Датчики были закреплены на трос с якорем так, что совмещенный датчик давления и температуры TDR RBR при установке попал в придонный

слой, а совмещенный датчик температуры и растворенного кислорода TDO RBR располагался на расстоянии одного метра над дном. Трос с датчиками был растянут за счет плава, погруженного на глубину около 0,5 м под лед. Верхний свободный конец троса выходил через лунку на поверхность льда, где был закреплен. Общая глубина в месте установки АС на момент ее погружения в воду 5 апреля (полная вода) составила 5,5 м. Дискретность измерений – одна минута. При последующем анализе данных датчика давления TDR RBR были введены поправки на изменение атмосферного давления по данным метеостанции Соловки (WMO 22429) [Расписание..., 2025]. По данным датчика давления TDR RBR получены сведения о ходе уровня в бухте в районе АС в период измерений.

Для получения информации о времени фаз приливного цикла выполнялось предвычисление уровня на 4–8 апреля 2025 г. с помощью программы WXTide32 (v. 4.7).

Зондирования на всех станциях проведены 6 апреля мультипараметрическим зондом RBR-Concerto в заранее подготовленных лунках дважды – на малой и затем на полной воде (табл. 1). Измеряемые параметры зонда RBR-Concerto – температура и соленость воды, поток фотосинтетической активной солнечной радиации (ФАР). Дискретность отсчетов зонда по вертикали 0,04–0,14 м.

Продолжительность измерений 6 апреля на всех станциях на малой воде составила 40 минут, на полной – 37 минут. Согласно результатам расчета уровня с помощью программы WXTide32 (v. 4.7), за время измерений на малой воде уровень увеличился на 2 см, на полной воде уменьшился на 1 см.

Оценка коэффициента ослабления солнечной радиации в воде  $\gamma$ , ассоциируемая с подледным освещенным слоем, выполнена с использованием экспоненциальной аппроксимации зависимости потока ФАР от глубины, в рамках однопараметрического приближения. Вычисления проводились по методу наименьших квадратов. Оценки выполнены для каждой станции для малой и полной воды.

Совмещенный датчик температуры и кислорода TDO RBR использовался для получения вертикального профиля этих параметров на ст. S-4 5 апреля и для измерений в подледном и придонном слоях на всех станциях 7 апреля. Продолжительность измерений на ст. S-4 5 апреля составила 8 минут, на всех станциях 7 апреля – 1 ч 20 мин. Согласно результатам расчета уровня с помощью программы WXTide32 (v. 4.7), за время измерений 5 апреля уровень не изменился, 7 апреля – уменьшился на 9 см.

Таблица 1. Периоды и виды измерений в бухте Благополучия Соловецких островов Белого моря в апреле 2025 г.  
Table 1. Periods and types of measurements in Blagopoluchiya Bay of the Solovetsky Islands of the White Sea in April 2025

| Период измерений<br>Periods of measurements                                                                                                                                                                                                                                         | Станция<br>Station   | Вид измерений, характеристика датчиков<br>Type of measurements, description of sensors                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 и 6 апреля<br>April 5, 6                                                                                                                                                                                                                                                          | S-4, S-5,<br>142–147 | Измерение толщины снега и льда и описание слоев ледяного покрова<br>Measurement of snow and ice thickness and description of ice cover layers                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 5 апреля 11:15 AC установлена (TDO+TDR) – 7 апреля 15:08 снят датчик кислорода (TDO)<br>7 апреля 17:10 снят датчик давления (TDR)<br>April 5, 11:15 AM, AC installed (TDO + TDR) – April 7, 3:08 PM, oxygen sensor removed (TDO)<br>April 7, 5:10 PM, pressure sensor removed (TDR) | AC                   | Измерение на автономной станции температуры воды и давления (датчик TDR RBR в придонном слое) и температуры воды и содержания растворенного кислорода (датчик TDO RBR закреплен в 1 м над дном), дискретность измерений – одна минута<br>Диапазон датчика температуры –5...+35 °C, точность ±0,002 °C<br>Диапазон датчика растворенного кислорода 0–150 %, точность 1 %<br>Диапазон датчика давления 500 дБ, точность ±0,001 %<br>Measurements of water temperature and pressure (TDR RBR sensor in the bottom layer) and water temperature and dissolved oxygen content (TDO RBR sensor fixed 1 m above the bottom) at an autonomous station, with a measurement resolution of one minute<br>The temperature sensor range is –5...+35 °C, with an accuracy of ±0.002 °C<br>The dissolved oxygen sensor range is 0–150 %, with an accuracy of 1 %<br>The pressure sensor range is 500 dB, with an accuracy of ±0.001 % |
| 6 апреля малая вода 7:48–8:28<br>полная вода 13:11–13:48<br>April 6: Low tide 7:48–8:28 AM<br>High tide 1:11–1:48 PM                                                                                                                                                                | S-4, S-5,<br>142–147 | Зондирование RBR-Concerto (температура воды, соленость, поток ФАР)<br>Диапазон датчика температуры –5...+35 °C, точность ±0,002 °C<br>RBR-Concerto profiling (water temperature, salinity, PAR flux)<br>The temperature sensor range is –5...+35 °C, with an accuracy of ±0.002 °C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 5 апреля 10:30–10:38 (прилив)<br>April 5, 10:30–10:38 AM (high tide)                                                                                                                                                                                                                | AC                   | Зондирование датчиком TDO RBR, датчик выдерживали примерно одну минуту на глубинах 0,9, 2, 3, 4, 5, 6 м<br>Диапазон датчика растворенного кислорода 0–150 %, точность 1 %<br>Probing with a TDO RBR sensor was performed for approximately one minute at depths of 0.9, 2, 3, 4, 5, and 6 m<br>The dissolved oxygen sensor range is 0–150 %, with an accuracy of 1 %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 7 апреля 15:38–16:56 (отлив)<br>April 7, 3:38–4:56 PM (low tide)                                                                                                                                                                                                                    | S-5, S-4,<br>142–147 | Зондирование датчиком TDO RBR, на каждой станции датчик выдерживали у нижней границы льда и вблизи дна в течение одной минуты<br>Диапазон датчика растворенного кислорода 0–150 %, точность 1 %<br>Probing with a TDO RBR sensor, at each station the sensor was kept at the lower edge of the ice and near the bottom for one minute<br>The dissolved oxygen sensor range is 0–150 %, with an accuracy of 1 %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

Особенности региональной климатической изменчивости Соловецких островов и погодные условия зимы 2024/25 гг. проанализированы по данным метеостанции Соловки (WMO 22429) [Расписание..., 2025; Погода..., 2025]. Для понимания динамики температуры за последние десятилетия тренды температуры воздуха (среднегодовое и среднемесячные значения) рассмотрены за три периода: 1960–2024 гг. (максимальная длина доступных для анализа однородных рядов), 1976–2024 гг. (период ускоренного роста температуры приземного воздуха для Европейской территории России выделен начиная с 1976 г. [Второй..., 2014]) и 2005–2024 гг. (современный этап). Анализ трендов выполнен в программе Excel. Уровень значимости трендов принимался при значении  $p < 0,01$ . В качестве климатической нормы использовались значения температуры воздуха, осредненные за 1961–1990 гг. по данным сайта [Погода..., 2025]. Тренды сумм осадков за год и за отдельные месяцы проанализированы за период 2008–2024 гг. Проанализировать изменение осадков за более

длительный период не представляется возможным в связи с неоднородностью рядов как годовых значений сумм осадков, так и помесечных до 2008 г. (большие пропуски в данных). Для характеристики погодных условий зимы 2024/25 гг. рассмотрены такие параметры, как температура воздуха, скорость ветра, атмосферное давление, осадки в период с 1 октября 2024 г. по 30 апреля 2025 г. по данным сайта [Расписание..., 2025].

Результаты и обсуждение

Особенности региональной климатической изменчивости Соловецких островов в 1960–2024 гг.

Анализ данных по метеостанции Соловки за 1960–2024 гг. показал статистически значимый рост температуры воздуха в среднем за год (+0,4 °C/10 лет) и в отдельные месяцы с января по май, в августе и сентябре (+0,3...+0,6 °C/10 лет) (табл. 2). В остальные месяцы года температура также увеличивалась

со скоростью +0,2...+0,4 °C/10 лет, но статистически незначимо. В период 1976–2024 гг. сохранялась тенденция роста температуры воздуха во все месяцы года, при этом увеличилась скорость роста в январе и декабре (+0,9 °C/10 лет) и с июля по октябрь (+0,5...+0,6 °C/10 лет). В последние два десятилетия (2005–2024 гг.) изменения температуры воздуха как в среднем за год, так и за каждый месяц года были статистически незначимы. Наибольший рост температуры воздуха в этот период происходил в феврале и марте (+1,5...+2,1 °C/10 лет), а также в июне, августе и сентябре (+0,7...+0,9 °C/10 лет), при этом температура воздуха в апреле и октябре–декабре слабо уменьшалась.

Изменение годовых и месячных сумм осадков в 2008–2024 гг. было статистически незначимо (табл. 2). За этот период годовая сумма осадков увеличивалась в среднем на 3 мм/год. Наибольшее увеличение осадков происходило

в январе и апреле (+1,4...+1,5 мм/год). В марте, сентябре, октябре и декабре сумма осадков увеличивалась на 0,4–0,5 мм/год. В мае–августе и ноябре сумма осадков уменьшалась на 0,2–1,1 мм/год.

Погодные условия зимы 2024/25 гг.

Согласно данным метеостанции Соловки, среднемесячная температура приземного слоя воздуха во все месяцы с октября 2024 г. по апрель 2025 г. была выше климатической нормы 1961–1990 гг. на 1,3–4,7 °C с наибольшим превышением в январе и феврале (рис. 2, а).

Атмосферное давление в рассматриваемый период менялось в пределах от 727 до 784 мм рт. ст. (рис. 2, б). Периоды роста и падения давления продолжались по несколько суток, максимальная величина барической тенденции достигала 7–8 мм рт. ст./3 ч. Менее флуктуирующим атмосферное давление было с середины

Таблица 2. Тренды температуры воздуха за год и месяцы года в 1960–2024, 1976–2024 и 2005–2024 гг. и сумм осадков в 2008–2024 гг.

Table 2. Trends in air temperature for the year and months of the year in 1960–2024, 1976–2024 and 2005–2024 and precipitation in 2008–2024

|                       | Температура воздуха<br>Air temperature                              |                                                                     |                                                   | Осадки<br>Precipitation                          |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                       | 1960–2024                                                           | 1976–2024                                                           | 2005–2024                                         | 2008–2024                                        |
| Январь<br>January     | $y = 0,06x - 11,10$<br>$R^2 = 0,11$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b> | $y = 0,09x - 11,00$<br>$R^2 = 0,15$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b> | $y = 0,02x - 7,43$<br>$R^2 = 0,0018$ $p = 0,80$   | $y = 1,47x + 34,27$<br>$R^2 = 0,22$ $p = 0,05$   |
| Февраль<br>February   | $y = 0,06x - 11,19$<br>$R^2 = 0,09$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b> | $y = 0,07x - 10,47$<br>$R^2 = 0,06$ $p = 0,07$                      | $y = 0,21x - 10,39$<br>$R^2 = 0,11$ $p = 0,15$    | $y = 0,14x + 31,11$<br>$R^2 = 0,002$ $p = 0,85$  |
| Март<br>March         | $y = 0,05x - 7,49$<br>$R^2 = 0,12$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = 0,04x - 6,05$<br>$R^2 = 0,04$ $p = 0,15$                       | $y = 0,15x - 6,41$<br>$R^2 = 0,10$ $p = 0,15$     | $y = 0,54x + 22,18$<br>$R^2 = 0,08$ $p = 0,27$   |
| Апрель<br>April       | $y = 0,03x - 1,77$<br>$R^2 = 0,12$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = 0,04x - 1,45$<br>$R^2 = 0,11$ $p = 0,01$                       | $y = -0,004x + 0,17$<br>$R^2 = 0,0005$ $p = 0,90$ | $y = 1,55x + 23,14$<br>$R^2 = 0,13$ $p = 0,16$   |
| Май<br>May            | $y = 0,04x + 3,22$<br>$R^2 = 0,16$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = 0,04x + 3,83$<br>$R^2 = 0,12$ $p = 0,01$                       | $y = 0,04x + 5,33$<br>$R^2 = 0,02$ $p = 0,53$     | $y = -0,23x + 36,33$<br>$R^2 = 0,003$ $p = 0,82$ |
| Июнь<br>June          | $y = 0,03x + 9,35$<br>$R^2 = 0,09$ $p = 0,01$                       | $y = 0,04x + 9,37$<br>$R^2 = 0,12$ $p = 0,01$                       | $y = 0,08x + 10,29$<br>$R^2 = 0,09$ $p = 0,19$    | $y = -0,10x + 50,19$<br>$R^2 = 0,001$ $p = 0,93$ |
| Июль<br>July          | $y = 0,02x + 13,30$<br>$R^2 = 0,05$ $p = 0,08$                      | $y = 0,05x + 12,66$<br>$R^2 = 0,19$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b> | $y = 0,05x + 13,98$<br>$R^2 = 0,02$ $p = 0,51$    | $y = -0,40x + 69,07$<br>$R^2 = 0,004$ $p = 0,93$ |
| Август<br>August      | $y = 0,03x + 11,76$<br>$R^2 = 0,14$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b> | $y = 0,06x + 11,04$<br>$R^2 = 0,42$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b> | $y = 0,07x + 12,82$<br>$R^2 = 0,09$ $p = 0,17$    | $y = -1,16x + 71,28$<br>$R^2 = 0,02$ $p = 0,50$  |
| Сентябрь<br>September | $y = 0,03x + 7,60$<br>$R^2 = 0,20$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = 0,06x + 7,32$<br>$R^2 = 0,35$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = 0,09x + 8,88$<br>$R^2 = 0,14$ $p = 0,1$      | $y = 0,49x + 50,52$<br>$R^2 = 0,01$ $p = 0,68$   |
| Октябрь<br>October    | $y = 0,03x + 2,55$<br>$R^2 = 0,10$ $p = 0,01$                       | $y = 0,05x + 2,51$<br>$R^2 = 0,15$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = -0,005x + 4,41$<br>$R^2 = 0,001$ $p = 0,90$  | $y = 0,42x + 72,20$<br>$R^2 = 0,003$ $p = 0,82$  |
| Ноябрь<br>November    | $y = 0,03x - 2,31$<br>$R^2 = 0,06$ $p = 0,04$                       | $y = 0,04x - 2,42$<br>$R^2 = 0,10$ $p = 0,02$                       | $y = -0,04x + 0,24$<br>$R^2 = 0,03$ $p = 0,49$    | $y = -0,09x + 55,34$<br>$R^2 = 0,001$ $p = 0,92$ |
| Декабрь<br>December   | $y = 0,04x - 6,85$<br>$R^2 = 0,08$ $p = 0,01$                       | $y = 0,09x - 7,46$<br>$R^2 = 0,17$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = -0,06x - 3,19$<br>$R^2 = 0,02$ $p = 0,61$    | $y = 0,43x + 47,27$<br>$R^2 = 0,02$ $p = 0,51$   |
| Год<br>Year           | $y = 0,04x + 0,59$<br>$R^2 = 0,35$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = 0,06x + 0,65$<br>$R^2 = 0,48$ <b><math>p &lt; 0,01</math></b>  | $y = 0,05x + 2,38$<br>$R^2 = 0,21$ $p = 0,04$     | $y = 3x + 562,88$<br>$R^2 = 0,02$ $p = 0,58$     |

Примечание. Жирным выделены  $p$ -значения статистически значимых трендов.

Note. Statistically significant trends are given in bold with  $p$ -values.

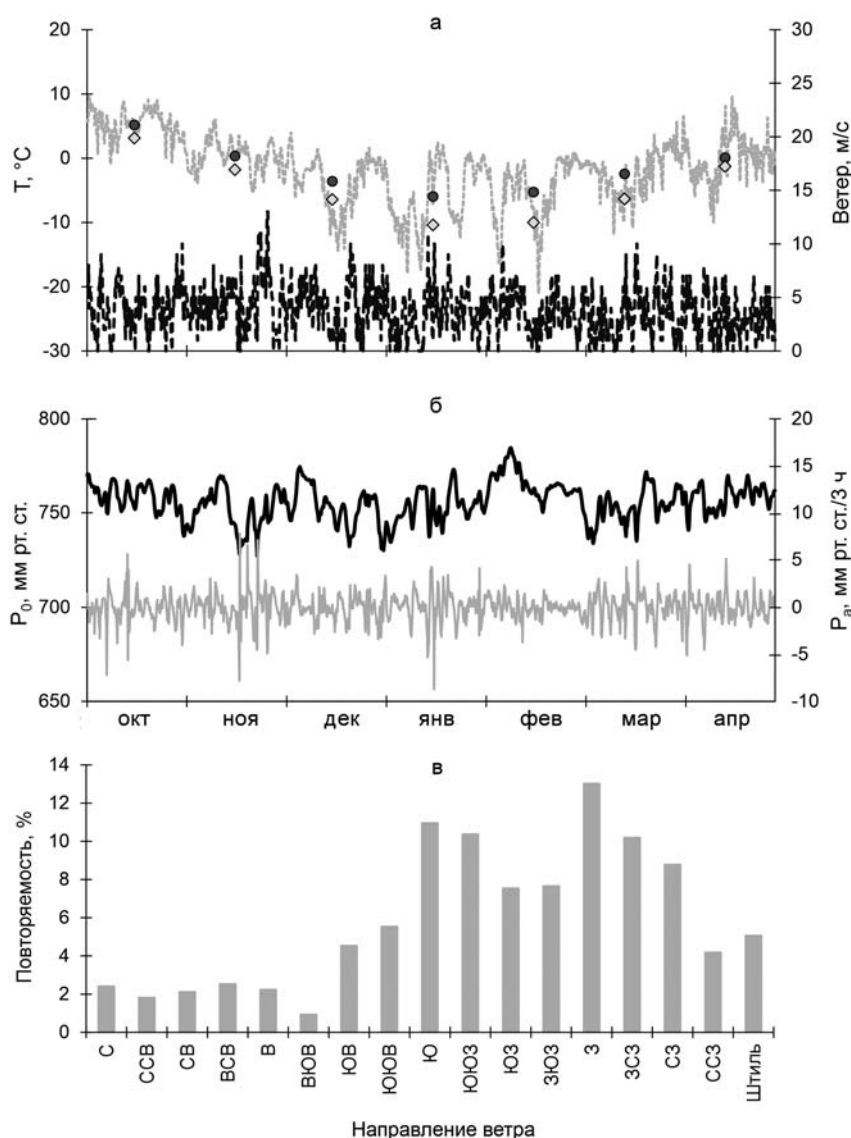


Рис. 2. а, б – погодные условия в период с 1 октября 2024 г. по 30 апреля 2025 г. по данным метеостанции Соловки:

1 – температура воздуха, 2 – скорость ветра, 3 – атмосферное давление на уровне станции P<sub>0</sub>, 4 – барическая тенденция P<sub>a</sub>, 5 – среднемесячные значения температуры воздуха в зимний сезон 2024/25 гг., 6 – среднемесячные значения температуры воздуха в 1961–1990 гг.;

в – повторяемость направлений ветра в период с 1 октября 2024 г. по 30 апреля 2025 г.

Fig. 2. а, б – weather from October 1, 2024 to April 30, 2025 according to the Solovki weather station:

1 – air temperature, 2 – wind speed, 3 – atmospheric pressure at station level P<sub>0</sub>, 4 – baric tendency P<sub>a</sub>, 5 – average monthly air temperature in the winter season 2024/25, 6 – average monthly air temperature in 1961–1990;

в – frequency of wind directions from October 1, 2024 to April 30, 2025

октября до середины ноября, в декабре 2024 г. и в феврале 2025 г. Наиболее резкие скачки атмосферного давления наблюдались в первую половину октября, вторую половину ноября 2024 г. и в середине января 2025 г. В марте и начале апреля 2025 г. атмосферное давление также резко менялось, барическая тенденция достигала 5 мм рт. ст./3 ч.

Средняя скорость ветра в период с октября 2024 г. по апрель 2025 г. составляла 3,8 м/с: в октябре–декабре – 4,0–4,5 м/с (с максимальным значением в ноябре), в январе–апреле – 3,2–3,7 м/с (с наименьшим значением в апреле). Повторяемость направлений ветра северных и восточных румбов с октября 2024 г. по апрель 2025 г. составляла 0,9–2,5 %, преобладали ветры западных и южных румбов (5–13 %); повторяемость штилей – 5,1 % (рис. 2, в). Наиболее часто

штили повторялись в марте (27 %), январе (24 %) и апреле (17 %), заметно реже – в декабре (6 %), ноябре (7 %), феврале (8 %) и октябре (10 %).

За неделю перед началом измерений стояла теплая ветреная погода, температура воздуха в дневные часы повышалась до 2–6 °С, в ночные опускалась до –0,3...–1,7 °С (рис. 3). Скорость ветра достигала 4–8 м/с, однако 31 марта – 2 апреля снизилась до 2–3 м/с. Начиная с 4 апреля наступило похолодание, и в период измерений в бухте температура воздуха в дневные часы не превышала –0,4 °С, в ночные – опускалась до –5,9 °С. Скорость ветра северных румбов 4–6 апреля достигала 4–7 м/с, с порывами до 10–20 м/с, 7 апреля – не превышала 3 м/с. Атмосферное давление росло 4–6 апреля от 741 до 767 мм рт. ст. Осадки в виде снега выпали 28 марта, 1 и 4 апреля.

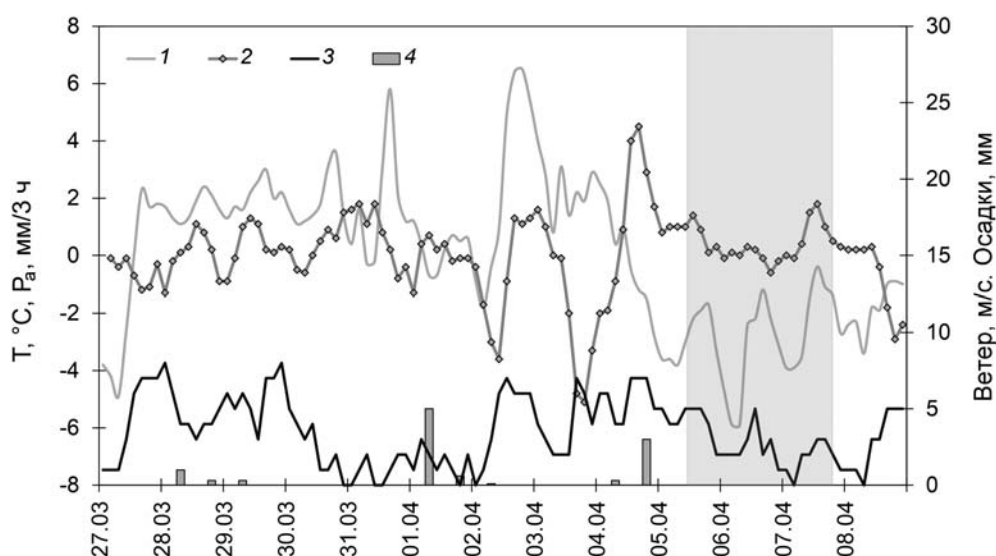


Рис. 3. Погодные условия в период с 27 марта по 8 апреля 2025 г. по данным метеостанции Соловки:

1 – температура воздуха, 2 – барическая тенденция  $P_a$ , 3 – скорость ветра, 4 – осадки. Затененная область – период измерений на автономной станции

Fig. 3. Weather from March 27 to April 8, 2025, according to the Solovki weather station:

1 – air temperature, 2 – baric tendency  $P_a$ , 3 – wind speed, 4 – precipitation. The shaded area – period of measurements at the autonomous station

#### Толщина и структура снежно-ледяного покрова

Согласно данным сайта Multimaps [2025], в начале апреля 2025 г. акватория Белого моря была свободна ото льда, но вдоль береговой линии заливов и островов существовал припай. Вокруг острова Б. Соловецкий наблюдался припайный лед, акватория бухты Благополучия была покрыта сплошным льдом.

Измерение толщины льда проведено 5 апреля 2025 г. на ст. S-4, 6 апреля – на ст. S-5 и всех станциях разреза (ст. 142–147) (табл. 3).

По всей акватории бухты поверхность льда была покрыта тонким слоем снега (0,5–1,0 см). Общая толщина льда изменялась от 57 (ст. S-5) до 72 см (ст. 147). На всех станциях выделялись слои нижнего конжеляционного (кристаллического) и верхнего белого (снежного) льда. На прибрежных станциях между слоями верхнего и нижнего льда и в верхнем слое льда выделялись две прослойки влажного снега и воды, на станциях 144 и 147 прослоек воды не было, на ст. 145 и 146 была только одна прослойка воды между верхним и нижним льдом. При удалении в сторону моря от ст. 147 подо льдом и метровой прослойкой воды обнаруживался второй слой льда, толщину которого установить не удалось, так как не хватило длины бура.

#### Ход уровня воды по данным автоматического датчика TDR и программы WXTide32 (v. 4.7)

Согласно результатам расчета приливов в программе WXTide32 (v. 4.7) и по показаниям датчика TDR RBR величина полусуточного прилива в бухте Благополучия 5–7 апреля 2025 г. составляла 0,5–0,7 м (рис. 4).

Сравнение величины прилива по данным датчика TDR RBR и программы WXTide32 (v. 4.7) показало хорошую сходимость: максимальная величина прилива по данным измерений составляла 0,65–0,66 м, по результатам вычислений с помощью программы 0,55 м время наступления фаз прилива отличалось на 15–40 минут.

Анализ данных датчика TDR RBR показал, что на приливе в показаниях с некоторого момента уровень переставал расти, несмотря на то, что прилив продолжался (затененные области на рис. 4, б). По всей видимости, это происходило из-за недостаточности свободной длины троса, к которому крепился плав. В результате в периоды полной воды происходило натягивание троса, к которому крепились датчики TDR RBR и TDO RBR, что приводило к всплытию всей станции. На рис. 5 приведена схема возможного положения станции на малой и полной воде. При всплытии станции датчики меняли свое начальное положение относительно дна, установить точно их положение затруднительно,

Таблица 3. Толщина слоев снега и льда в бухте Благополучия 5 и 6 апреля 2025 г.

Table 3. Thickness of snow and ice in Blagopoluchiya Bay on April 5 and 6, 2025

| Станция<br>Station | Дата, время<br>Date, time         | Толщина, см<br>Thickness, cm |         | Примечание<br>Note                                                                 |
|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------|
| S-4                | 5 апреля 9:50<br>April 5 9:50 AM  | Лед / Ice                    | 67      | с двумя прослойками влажного снега и воды<br>with two layers of wet snow and water |
|                    |                                   | Снег / Snow                  | 0,5     |                                                                                    |
| S-5                | 6 апреля 16:23<br>April 6 4:23 PM | Лед / Ice                    | 57      | «                                                                                  |
|                    |                                   | Снег / Snow                  | 0,5     |                                                                                    |
| 142                | 6 апреля 16:49<br>April 6 4:49 PM | Лед / Ice                    | 60      | «                                                                                  |
|                    |                                   | Снег / Snow                  | 0,5–1,0 |                                                                                    |
| 143                | 6 апреля 16:59<br>April 6 4:59 PM | Лед / Ice                    | 57      | «                                                                                  |
|                    |                                   | Снег / Snow                  | 0,5     |                                                                                    |
| 144                | 6 апреля 17:16<br>April 6 5:16 PM | Лед / Ice                    | 65      | без прослоек влажного снега и воды<br>without layers of wet snow and water         |
|                    |                                   | Снег / Snow                  | 0,5     |                                                                                    |
| 145                | 6 апреля 17:35<br>April 6 5:35 PM | Лед / Ice                    | 65      | одна прослойка влажного снега и воды<br>one layer of wet snow and water            |
|                    |                                   | Снег / Snow                  | 0,5     |                                                                                    |
| 146                | 6 апреля 17:50<br>April 6 5:50 PM | Лед / Ice                    | 58      | «                                                                                  |
|                    |                                   | Снег / Snow                  | 0,5     |                                                                                    |
| 147                | 6 апреля 18:13<br>April 6 6:13 PM | Лед / Ice                    | 72      | без прослоек влажного снега и воды<br>without layers of wet snow and water         |
|                    |                                   | Снег / Snow                  | 0,5     |                                                                                    |

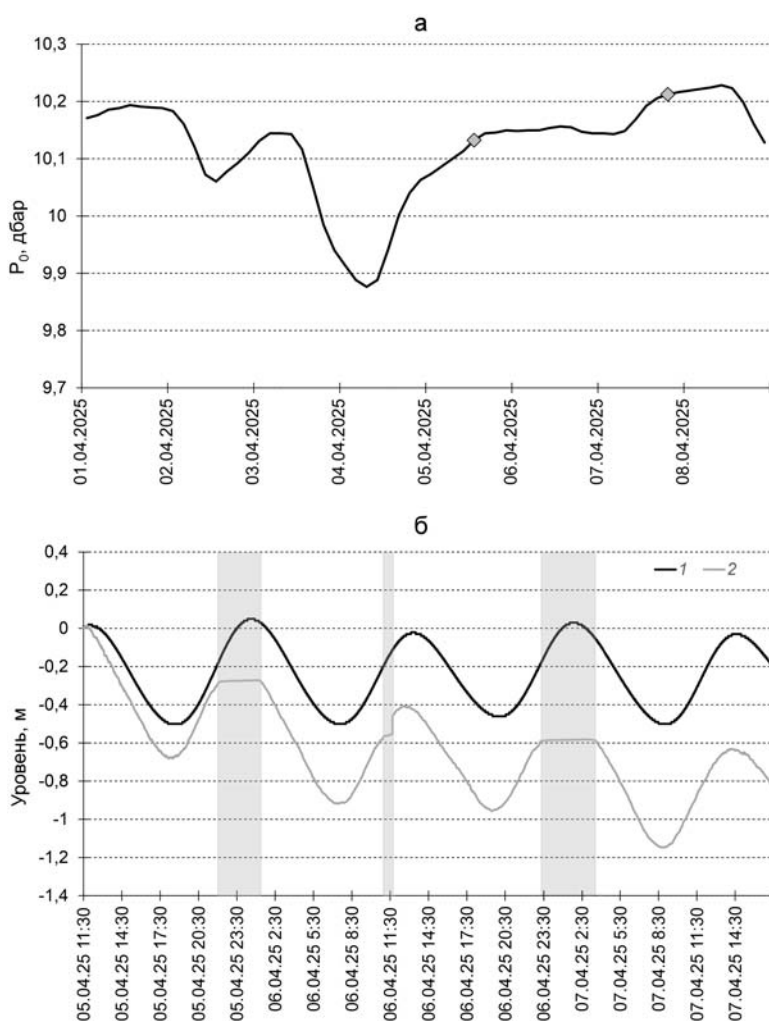


Рис. 4. а – изменение атмосферного давления на уровне метеостанции Соловки с 1 по 8 апреля 2025 г. Символами обозначен период начала и окончания измерений давления на автономной станции датчиком TDR RBR; б – ход уровня моря по результатам вычислений с помощью программы WXTide32 (v. 4.7) (1) и измеренный автономным датчиком TDR RBR в бухте Благополучия на ст. АС (2) 5–7 апреля 2025 г. Затененные области – начало и окончание периодов некорректных измерений. Вертикальные оси приведены к единому нулю

Fig. 4. а – change in atmospheric pressure at the Solovki weather station from April 1 to 8, 2025. The symbols indicate the start and end periods of pressure measurements at the autonomous station by a TDR RBR sensor; б – sea level variation based on calculations using the WXTide32 (v. 4.7) software (1) and measured by an autonomous TDR RBR sensor in Blagopoluchiya Bay at the AC station (2) on April 5–7, 2025. The shaded areas are the beginning and end of the periods of incorrect measurements. The vertical axes are reduced to a common zero

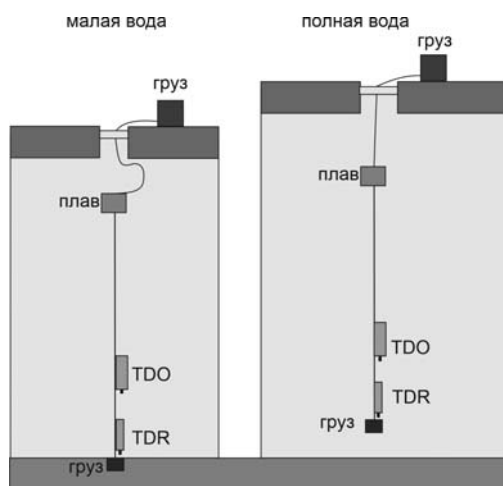


Рис. 5. Схема положения плавка, троса с датчиками и груза на малой и полной воде

Fig. 5. Scheme of the position of the float, cable with sensors and weight at low and high water

поэтому такие периоды в анализе не использовались (см. затененные области на рис. 4, б и 6).

Стоит отметить, что согласно данным датчика давления TDR RBR в период измерений 5–7 апреля 2025 г. в бухте произошло понижение уровня примерно на 0,5 м (рис. 4, б), в то время как по результатам вычислений с помощью

программы WXTide32 (v. 4.7) эта особенность не проявилась. Предположительно, снижение уровня воды в бухте могло быть спровоцировано сгоном воды на фоне сильных ветров северных румбов 4–6 апреля. Возможно также, падение уровня связано с особенностями остаточной приливной циркуляции в бухте в присутствии льда, так как при измерениях в период открытой воды в августе 2024 г. заметных расхождений между показаниями датчика давления и результатами расчета с помощью программы WXTide32 (v. 4.7) не выявлено [Лукина и др., 2025].

#### Изменение температуры воды и содержания растворенного кислорода по данным автономной станции

Согласно данным автоматических датчиков TDR RBR и TDO RBR, в период измерений 5–7 апреля 2025 г. в районе АС в придонном слое и на расстоянии одного метра над дном не наблюдалось полусуточной периодичности температуры и содержания растворенного в воде кислорода (рис. 6).

В показаниях температурных и кислородного датчиков АС присутствовали колебания с периодами от минут до часов, кроме того, была выявлена изменчивость с большим периодом

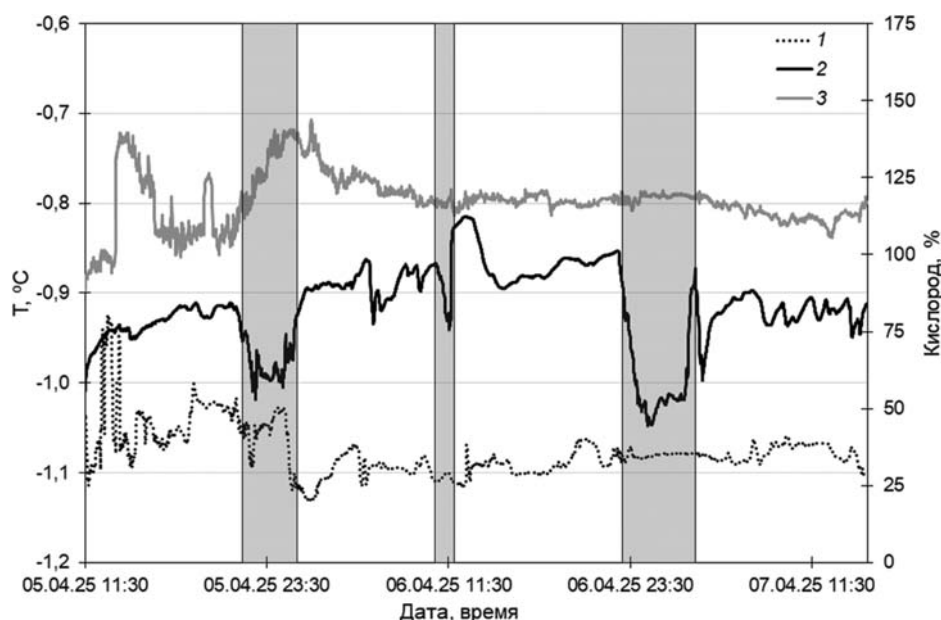


Рис. 6. Температура воды на расстоянии 1 м над дном (1, датчик TDO) и в придонном слое (2, датчик TDR) и содержание растворенного кислорода на расстоянии 1 м от дна (3, датчик TDO) 5–7 апреля 2025 г. Затененные области показывают периоды некорректных измерений

Fig. 6. Water temperature at a distance of 1 m above the bottom (1, TDO sensor) and in the bottom layer (2, TDR sensor) and dissolved oxygen at a distance of 1 m above the bottom (3, TDO sensor) on April 5–7, 2025. The shaded areas indicate periods of incorrect measurements

(десятки часов). В первые сутки измерений на АС в придонном слое (датчик TDR) происходило повышение температуры воды на 0,2 °C (от –1,0 до –0,8 °C), во вторые сутки – снижение на 0,1 °C (до –0,9 °C). На расстоянии 1 м над дном (датчик TDO) в первые 12 ч измерений наблюдалось повышение температуры на 0,1 °C, затем температура вернулась к начальному уровню (–1,1 °C) и колебалась в пределах 0,01–0,04 °C. Содержание растворенного кислорода в первые 12 ч измерений изменялось в пределах 90–130 %, затем сохранялось в пределах 105–125 %, наблюдались колебания с периодами от минут до часов.

Изменения как температуры воды, так и содержания растворенного кислорода с периодом в десятки часов в придонном слое бухты Благополучия, обнаруженные в апреле 2025 г. (рис. 6), могут быть связаны с формированием остаточной приливной циркуляции в акватории бухты. Известно, что периодическое действие прилива на зону смешения и трансформации морских и речных вод в эстуарных зонах способствует интенсификации турбулентного перемешивания, формированию возвратных течений, сложных схем остаточной циркуляции

[Лупачев, 1984; Лапина, 2001; Май, Фукс, 2005; Зырянов, Чебанова, 2016]. В эстуариях приливных рек отмечается периодическое увеличение мутности, обусловленное взмучиванием донных отложений приливыми и отливными течениями, а также при торошении льда и его трении о донные отложения, образование мутьевой пробки в пределах области реверсивных течений [Мискевич и др., 2022].

Измерение содержания растворенного кислорода совмещенным датчиком температуры и кислорода TDO RBR на ст. S-4 5 апреля показало, что на глубине 0,9 м содержание кислорода было наименьшим по толще воды, а температура наибольшей. Судя по всему, датчик при измерениях в подледном слое попал в слой смешения сточных и морских вод. В нижележащих слоях насыщение воды кислородом было существенно выше и достигало 89 % в придонном слое, а температура воды – существенно ниже (–1,29...–1,01 °C) (табл. 4).

Измерения датчиком TDO RBR в подледном и придонном слоях на всех станциях 7 апреля показали минимальное содержание кислорода в подледном слое ст. S-4 вблизи сброса сточных вод (табл. 5). На всех станциях температура

Таблица 4. Температура воды и содержание растворенного кислорода (ПК) на разных глубинах на ст. S-4 на приливе 5 апреля 2025 г.

Table 4. Water temperature and dissolved oxygen (DO) content at different depths at station S-4 at high tide on April 5, 2025

| Время<br>Time | Глубина, м<br>Depth, m | T, °C | ПК, %<br>DO, % |
|---------------|------------------------|-------|----------------|
| 10:30         | 0,9                    | –0,02 | 69             |
| 10:34         | 2,0                    | –1,29 | 81             |
| 10:37         | 3,0                    | –1,01 | 81             |
| 10:41         | 4,0                    | –1,06 | 79             |
| 10:44         | 5,0                    | –1,01 | 78             |
| 10:48         | 6,0                    | –1,05 | 89             |

Таблица 5. Температура воды и содержание растворенного кислорода (ПК) в подледном и придонном слоях станций в бухте Благополучия 7 апреля 2025 г. на отливе

Table 5. Water temperature and dissolved oxygen (DO) content in the sub-ice and bottom layers of stations in Blagopoluchiya Bay on April 7, 2025 at low tide

| Станция<br>Station | Время<br>Time | Подледный слой<br>Sub-ice layer |                | Придонный слой<br>Bottom layer |                |
|--------------------|---------------|---------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
|                    |               | T, °C                           | ПК, %<br>DO, % | T, °C                          | ПК, %<br>DO, % |
| S-5                | 15:38–15:42   | 0,35                            | 87             | –1,01                          | 89             |
| S-4                | 15:52–15:55   | –0,02                           | 58             | –1,01                          | 102            |
| 142                | 16:02–16:05   | –0,01                           | 95             | –1,01                          | 107            |
| 143                | 16:12–16:15   | 0,13                            | 106            | –0,88                          | 100            |
| 144                | 16:22–16:26   | –0,02                           | 103            | –0,94                          | 105            |
| 145                | 16:33–16:37   | –0,03                           | 89             | –1,00                          | 102            |
| 146                | 16:44–16:48   | –0,01                           | 92             | –0,97                          | 98             |
| 147                | 16:56–16:59   | 0,01                            | 98             | –1,11                          | 110            |

воды была заметно выше, а содержание кислорода ниже в подледном слое, чем в придонном, что свидетельствует о распространении сточных вод в подледном слое по акватории бухты.

Высокий процент насыщения воды кислородом в бухте Благополучия ниже слоя сточных вод может быть связан с развитием фитопланктона. Для эстуарных зон рек Белого моря в конце зимнего периода характерно высокое содержание кислорода в воде как на приливе, так и на отливе, что связывают с развитием фитопланктона [Мискевич, 2019, 2024]. В бухте Благополучия высокая обеспеченность питательными веществами [Калинкина и др., в печати] может способствовать активному фотосинтезу с выделением кислорода.

*Изменение температуры и солёности в приливном цикле по результатам зондирования*

Анализ вертикальных профилей температуры и солёности воды позволил установить, что сточные воды поселка Соловецкий распространяются по акватории бухты в подледном слое, нижняя граница которого идентифицируется по

уменьшению температуры и росту солёности на глубинах 1,2–1,3 м (рис. 7–9). Слой смешения сточных и морских вод с резким уменьшением температуры и увеличением солёности занимает глубины 1,3–2,3 м. На верхней границе этого слоя (глубины 1,3–1,4 м) температура воды достигает  $+0,3...+0,4$  °C, а солёность не превышает 0,3–0,5 ‰. На нижней границе слоя смешения (глубины 1,7–2,3 м) значения температуры воды отрицательные и не превышают  $-0,9$  °C, а значения солёности более 26 ‰. На полной воде в слое смешения отмечено понижение температуры воды до отрицательных значений и повышение солёности до 8–23 ‰.

Наиболее существенное уменьшение температуры воды (на  $0,5–0,6$  °C) и увеличение солёности (на 20–23 ‰) в слое смешения между малой и полной водой обнаружено на прибрежных мелководных станциях и в центральной части бухты (рис. 8, 9). По мере удаления в сторону открытого моря изменения температуры и солёности в слое смешения в приливном цикле уменьшаются: на расстоянии 300 м от выпуска сточных вод температура в слое смешения между малой и полной водой меняется всего на  $0,01–0,02$  °C, а солёность – на 5–8 ‰.

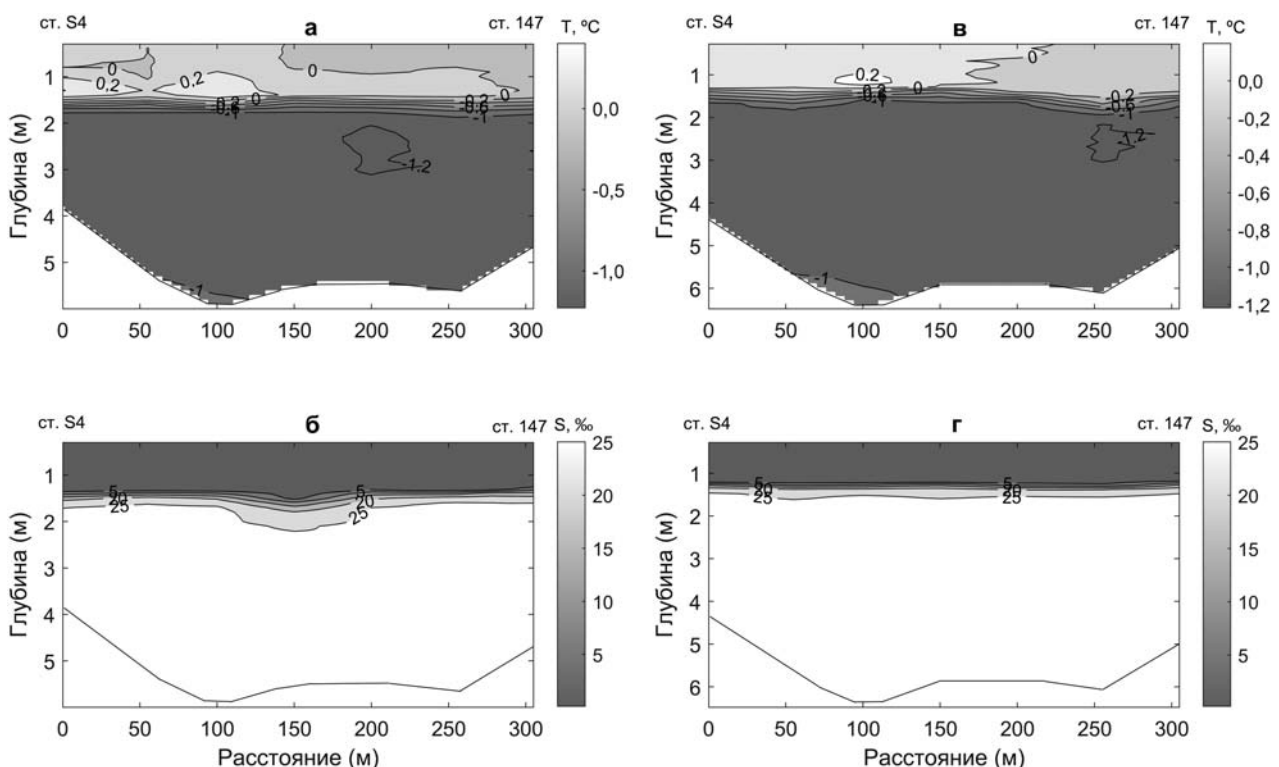


Рис. 7. Распределение температуры (а, в) и солёности (б, г) воды на станциях разреза от ст. S-4 до ст. 147 6 апреля 2025 г. на малой воде (07:54–08:30) (а, б) и полной воде (13:18–13:50) (в, г)

Fig. 7. Distribution of water temperature (а, в) and salinity (б, г) at stations along the section from station S-4 to station 147 on April 6, 2025 at low tide (07:54–08:30 AM) (а, б) and high tide (13:18–13:50 PM) (в, г)

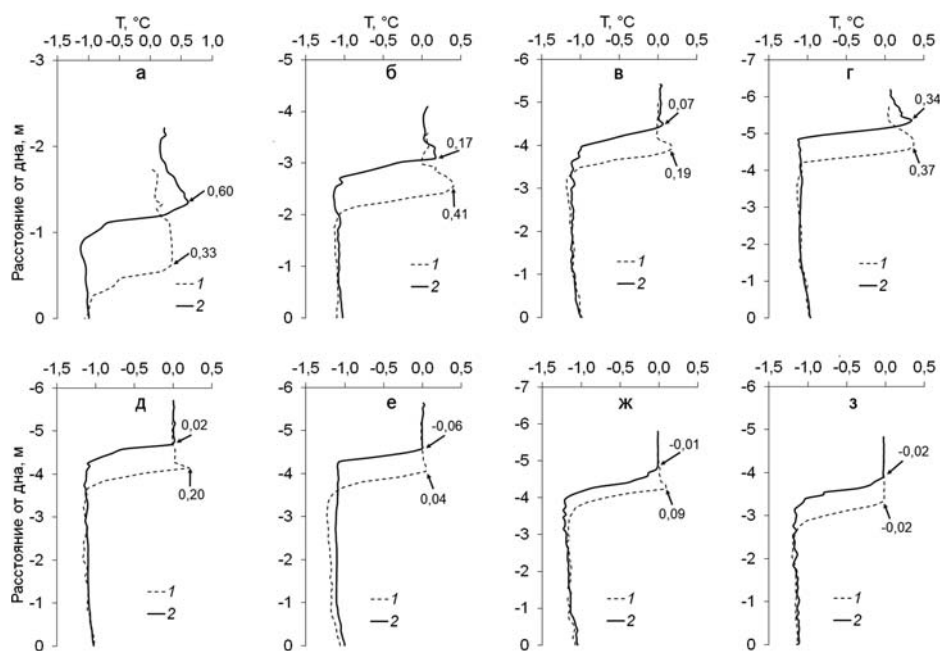


Рис. 8. Вертикальные профили температуры на станциях S-5 (а), S-4 (б), 142 (в), 143 (г), 144 (д), 145 (е), 146 (ж), 147 (з) 6 апреля 2025 г.:  
1 – малая вода (07:54–08:30), 2 – полная вода (13:18–13:50). Цифры на рисунках – максимальные значения температуры на малой и полной воде

Fig. 8. Vertical temperature profiles at stations S-5 (a), S-4 (б), 142 (в), 143 (г), 144 (д), 145 (е), 146 (ж), 147 (з) on April 6, 2025:  
1 – low tide (07:54–08:30 AM), 2 – high tide (1:18–1:50 PM). The numbers in the figures are the maximum temperature values at low and high tide

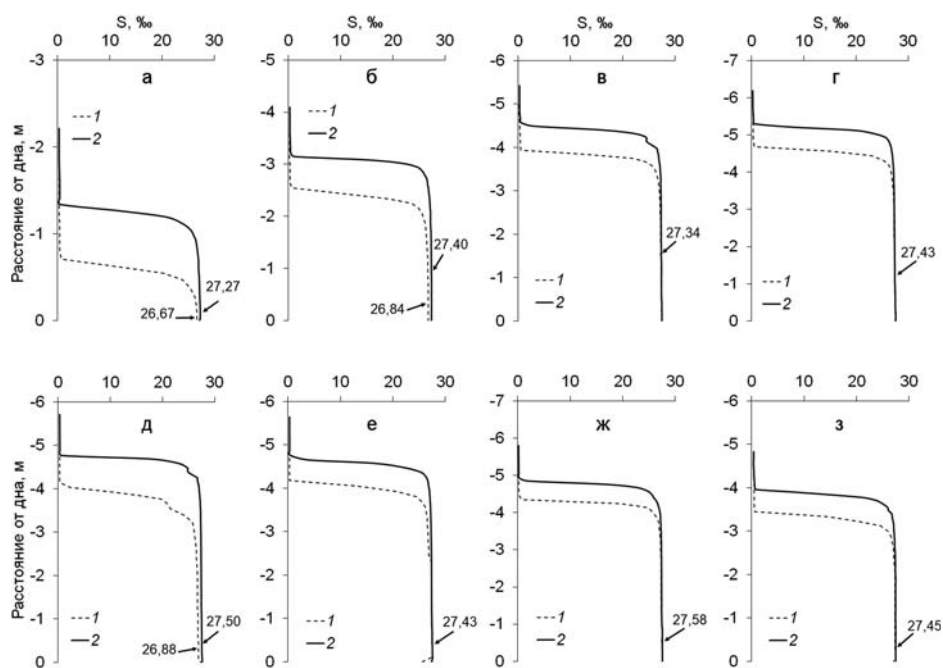


Рис. 9. Вертикальные профили солёности на станциях S-5 (а), S-4 (б), 142 (в), 143 (г), 144 (д), 145 (е), 146 (ж), 147 (з) 6 апреля 2025 г.:  
1 – малая вода (07:54–08:30), 2 – полная вода (13:18–13:50). Цифры на рисунках – максимальные значения солёности на малой и полной воде

Fig. 9. Vertical salinity profiles at stations S-5 (a), S-4 (б), 142 (в), 143 (г), 144 (д), 145 (е), 146 (ж), 147 (з) on April 6, 2025:  
1 – low tide (07:54–08:30), 2 – high tide (1:18–1:50 PM). The numbers in the figures are the maximum salinity at low and high tide

Выявленные особенности распределения сточных вод по акватории бухты (глубины слоев сточных вод, слоя смешения, сохранение стратификации водной толщи на всех фазах приливного цикла) следует учитывать при выборе глубин отбора проб и глубин установки датчиков автономных станций. Если требуется отбор проб и измерение температуры и содержания растворенного кислорода именно из слоя сточных вод, слоя смешения или вне этих слоев, предварительно рекомендуется провести профилирование водной толщи на станции на фазах полной и малой воды для выявления глубин слоев по показаниям температуры и солености. При измерениях в период открытой воды [Лукина и др., 2025] слой сточных вод по показаниям температуры и солености не идентифицировался, так как водная толща бухты хорошо перемешивалась под действием ветра. Роль льда, изолирующего водную толщу от ветрового перемешивания, в сохранении стратификации в устьевых областях рек, впадающих в заливы Белого моря, обсуждается также в работах [Терский и др., 2021, 2024]. Сохранение устойчивой вертикальной стратификации вод зимой при наличии ледяного покрова обнаружено и в дельтовых протоках р. Северной Двины в Белом море в зоне смешения речных и морских вод [Мискевич и др., 2022]. Оценка динамики зоны смешения морских и речных вод в устьевой области р. Онега приведена в [Справочно-аналитический..., 2023].

*Потоки фотосинтетической солнечной радиации и коэффициент экстинкции*

По показаниям мультипараметрического зонда RBR-Concerto установлено, что потоки солнечной радиации вблизи поверхности воды в полуденные часы 5 апреля 2025 г. достигали 100–1600 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с), резко уменьшаясь до 35–45 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) на глубине 1 м и до близких к нулю значений на глубинах 2,5–3,0 м на всех станциях. Поскольку слой сточных вод присутствовал на всех станциях измерений

ФАР и не было проведено измерений потоков ФАР в водной толще вне зоны влияния сточных вод, пока не представляется возможным сопоставить ослабление ФАР именно за счет влияния сточных вод с фоновыми значениями.

Практически на всех станциях обнаружена существенная разница между значениями  $\gamma$  для малой и полной воды (табл. 6). Такая разница (как и отмеченные выше приливные вариации значений температуры и солености) косвенно свидетельствует о разбавлении сточных вод на приливе и частичном их выносе из бухты на отливе.

Максимальные значения  $\gamma$  как на малой, так и на полной воде получены для ст. S-4 и 142, расположенных наиболее близко к точке сброса сточных вод. Выявлено уменьшение величины  $\gamma$  по направлению к выходу из бухты и на малой, и на полной воде, что свидетельствует о наибольшем влиянии сточных вод на освещенность водной толщи в вершине бухты.

**Заключение**

Проведенные в бухте Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в начале апреля 2025 г. экспедиционные исследования позволили установить характер изменения температуры и солености воды, содержания растворенного кислорода, потоков солнечной радиации в толще воды в приливном цикле при наличии ледяного покрова. Установлено, что поток сточных вод (температура +0,3...+0,4 °С, соленость 0,3–0,5 ‰) распространяется в подледном слое по акватории бухты на расстояние более 300 м от места сброса. Ниже слоя сточных вод на глубинах 1,3–2,3 м идентифицируется слой смешения сточных и морских вод с резкими градиентами температуры и солености; температура и соленость морских вод ниже слоя смешения меняются слабо в приливном цикле (температура –1,1 °С, соленость 27,5 ‰). Выявлены существенные изменения температуры (уменьшение до отрицательных значений) и солености (увеличение до 8–23 ‰) воды в слое смешения на полной воде.

Таблица 6. Результаты расчета коэффициента экстинкции (м<sup>-1</sup>) для периодов малой (МВ) и полной (ПВ) воды  
Table 6. Results of calculating the extinction coefficient (m<sup>-1</sup>) for periods of low tide (MB) and high tide (PB)

| Станция / $\gamma$ (м <sup>-1</sup> )<br>Station / $\gamma$ (м <sup>-1</sup> ) | S5  | S4  | 142 | 143 | 144  | 145 | 146  | 147 |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|
| МВ                                                                             | 4,0 | 6,5 | 5,5 | 3,3 | 4,15 | 3,9 | 3,1  | 3,4 |
| ПВ                                                                             | 3,1 | 5,1 | 3,7 | 3,3 | 2,5  | 2,7 | 2,86 | 2,7 |

Установлено, что в слое сточных вод содержание растворенного кислорода (60–70 %) заметно ниже, чем в придонном слое вне зоны влияния сточных вод (насыщение 90–130 %) на всех фазах прилива.

Выявленные особенности вертикальной структуры водной толщи в бухте (глубины слоя сточных вод, слоя смешения сточных и морских вод, сохранение стратификации на всех фазах прилива) следует учитывать при выборе глубин отбора проб и глубин установки автономных датчиков в период ледостава. Если требуется отбор проб и измерение температуры и содержания растворенного кислорода именно из слоя сточных вод, слоя смешения или вне этих слоев, предварительно рекомендуется провести профилирование водной толщи на станции на фазах полной и малой воды для выявления глубин слоев по показателям температуры и солености.

Резкое уменьшение потока солнечной радиации в слое сточных вод и слое смешения определяет низкую освещенность водной толщи, с близкими к нулю значениями солнечной радиации глубже 2–3 м. Аномально высокие значения коэффициента экстинкции в кутовой части бухты (5,5 и 6,5 м<sup>-1</sup> на станциях 142 и S4 соответственно) свидетельствуют о высокой мутности сточных вод. При этом как на полной, так и на малой воде зафиксировано почти двукратное уменьшение этого коэффициента по направлению от вершины бухты к выходу в море (от станции 143 к станции 147), что свидетельствует о хорошо выраженном максимуме концентрации сточных вод в вершине бухты. На всех станциях обнаружено существенное (в среднем около 30 %) уменьшение коэффициента экстинкции на полной воде по сравнению с малой водой, что указывает на частичный вынос сточных вод морским приливом.

Установленные особенности распределения сточных вод по акватории бухты в период ледостава в апреле 2025 г. позволили выявить зону наибольшего антропогенного влияния на экосистему бухты в зимний период (подледный слой) и спланировать полевые эксперименты на следующий зимний сезон 2026 г. Задачи на следующий полевой сезон включают установление границ зоны распространения сточных вод в сторону открытого моря, измерения потоков ФАР в водной толще вне зоны влияния сточных вод, длительные измерения автономными датчиками температуры и содержания растворенного кислорода в слое сточных вод и слое смешения в кутовой и мористой частях бухты.

## Литература

Болгов М. В. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Онега / Под ред. О. В. Горелиц, Г. С. Ермаковой, Г. Ш. Турсуновой. Воронеж: Воронеж. обл. тип., 2023. 334 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховской, Ф. С. Терзиева. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.

Зырянов В. Н., Чебанова М. К. Гидродинамические эффекты при вхождении приливных волн в эстуарии // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 4. С. 379–386. doi: 10.7868/S0321059616040180

Калинкина Н. М., Галахина Н. Е., Костромин Е. А., Усов Н. В., Сластина Ю. Л. Трофический статус бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в летний период 2024 года // Арктика: экология и экономика. (В печати)

Лапина Л. Э. Динамика течений и особенности переноса консервативной примеси в устьевых областях приливных рек. Сыктывкар, 2001. 140 с.

Лоция Белого моря. Л.: Мин. обороны СССР, ГУНиО, 1983. № 4766. 344 с.

Лукина Ю. Н., Здорвеннов Р. Э., Толстиков А. В., Галахина Н. Е., Богданов С. Р., Сабылина А. В., Здорвеннова Г. Э. Особенности гидродинамического и гидрохимического режимов бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в августе 2024 г. // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15, № 2. С. 287–299. doi: 10.25283/2223-4594-2025-2-287-299

Лупачев Ю. В. Динамическое взаимодействие морских и речных вод в приливных устьях рек // Труды ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 64–82.

Май Р. И., Фукс В. Р. Остаточные приливные явления в Белом море // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря: Мат-лы IX Междунар. конф. (г. Петрозаводск, 11–14 октября 2004 г.). Петрозаводск, 2005. С. 202–207.

Мискевич И. В., Котова Е. И., Нецветаева О. П. Особенности вертикальной структуры маргинального фильтра в устьях рек с устойчивым галоклином в зимний период на примере дельты Северной Двины // Успехи современного естествознания. 2022. № 11. С. 61–65. doi: 10.17513/use.37929

Мискевич И. В., Лещев А. В., Махнович Н. М., Мосеев Д. С., Нецветаева О. П. Короткопериодная изменчивость структуры маргинального фильтра в мезоприливном эстуарии малой реки в Белом море на примере устья р. Тамицы Онежского залива // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 109-15. С. 142–145. doi: 10.18411/trnio-05-2024-808

Мискевич И. В., Лещев А. В., Мосеев Д. С., Лохов А. С. Гидролого-гидрохимические исследования устьев малых рек Белого моря в зимнюю межень 2019 года // Океанология. 2019. Т. 59, № 8. С. 1089–1092. doi: 10.31857/S0030-15745961089-1092

Погода и климат [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 05.08.2025).

Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 05.08.2025).

Стратегия развития Соловецкого архипелага – уникального объекта духовного, историко-культурного и природного наследия как самостоятельного компонента Стратегии социально-экономического развития Архангельской области до 2030 года. Распоряжение Правительства Архангельской области от 16.07.2013 г № 310-РП.

Терский П. Н., Горин С. Л., Панченко Е. Д., Алабян А. М., Ахмерова Н. Д., Василенко А. Н., Иванов В. А., Крастынь Е. А., Куликова Ж. М., Мигунов Д. А., Попрядухин А. А., Фатхи М. О., Харламов М. А. Приливное устье реки Варзуги (Российская субарктика): первые сведения о зимнем гидрологическом режиме // Водные ресурсы. 2024. Т. 51, № 2. С. 145–156. doi: 10.31857/S0321059624020019

Терский П. Н., Панченко Е. Д., Горин С. Л., Агафонова С. А., Василенко А. Н., Куликова Ж. М., Попрядухин А. А., Алабян А. М. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017–2020 гг. // Океанология. 2021. Т. 61, № 6. С. 1006–1008. doi: 10.31857/S0030157421060162

Филатов Н. Н., Бахмет О. Н., Дружинин П. В., Меншуткин В. В., Назарова Л. Е. Оценка состояния и изменения эколого-социоэкономической системы Белого моря и водосбора // Вестник РФФИ. 2022. № 2(114). С. 102–118. doi: 10.22204/2410-4639-2022-114-02-102-118

Multimaps [Электронный ресурс]. URL: <https://multimaps.ru> (дата обращения: 05.08.2025).

## References

Bolgov M. V. Reference and analytical review of the hydrological regime of the mouth area of the Onega River. Voronezh: Voronezh. obl. tip.; 2023. 334 p. (In Russ.)

Development strategy for the Solovetsky Archipelago – a unique site of spiritual, historical, cultural, and natural heritage as an independent component of the Strategy for the Socioeconomic Development of the Arkhangelsk Region until 2030. Order of the Government of the Arkhangelsk Region dated July 16, 2013, No. 310-RP. (In Russ.)

Filatov N. N., Bakhmet O. N., Druzhinin P. V., Menshutkin V. V., Nazarova L. E. Assessment of the current state and changes of the ecological and socio-economic system of White Sea and its catchment. *Vestnik RFFI = RFFI Journal*. 2022;2(114):102–118. (In Russ.). doi: 10.22204/2410-4639-2022-114-02-102-118

Glukhovskaya B. Kh., Terziev F. S. (eds.). Hydro-meteorology and hydrochemistry of the seas in the USSR. Vol. 2. White Sea. Iss. 1. Hydrometeorological conditions. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 240 p. (In Russ.)

Kalinkina N. M., Galakhina N. E., Kostromin E. A., Usov N. V., Slastina Yu. L. Trophic status of Blagopoluchiy Bay (Solovetsky Islands of the White Sea)

in the summer of 2024. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy* (in press). (In Russ.)

Lapina L. E. Dynamics of currents and features of conservative components transport in the mouth areas of tidal rivers. Syktyvkar; 2001. 140 p. (In Russ.).

Lukina Yu. N., Zdorovenov R. E., Tolstikov A. V., Galakhina N. E., Bogdanov S. R., Sabylina A. V., Zdorovenova G. E. Features of the hydrodynamic and hydrochemical states of Blagopoluchiy Bay (Solovetsky Islands of the White Sea) in August 2024. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2025; 15(2):287–299. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2025-2-287-299

Lupachev Yu. V. Dynamic interaction of sea and river waters in tidal estuaries. *Trudy GOIN = The SOI's Proceedings*. 1984;172:64–82. (In Russ.)

Mai R. I., Fuks V. R. Remaining tides in the White Sea. *Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany resursov Belogo morya: Mat-ly IX mezhdunar. konf. (g. Petrozavodsk, 11–14 oktyabrya 2004 g.) = Issues of study, rational use and protection of resources of the White Sea: Proceed. of the IX int. conf. (Petrozavodsk, Oct. 11–14, 2004)*. Petrozavodsk; 2005. P. 202–207. (In Russ.)

Miskevich I. V., Kotova E. I., Netsvetaeva O. P. Peculiarities of the vertical structure of a marginal filter in the mouth of rivers with a stable halocline in winter on the example of the delta of the Northern Dvina. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2022;11:61–65. (In Russ.). doi: 10.17513/use.37929

Miskevich I. V., Leshchev A. V., Makhnovich N. M., Moseev D. S., Netsvetaeva O. P. Short-term variability of the marginal filter structure in a mesotidal estuary of a small river in the White Sea on the example of the mouth of the Tamitsa River in Onega Bay. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the Development of Science and Education*. 2024;109-15:142–145. (In Russ.). doi: 10.18411/trnio-05-2024-808

Miskevich I. V., Leshchev A. V., Moseev D. S., Lokhov A. S. Hydrological and hydrochemical research of the mouths of the small rivers flowing to the White Sea in the winter low-water season of 2019. *Okeanologiya = Oceanology*. 2019;59(8):1089–1092. (In Russ.). doi: 10.31857/S0030-15745961089-1092

Multimaps. URL: <https://multimaps.ru> (accessed: 05.08.2025).

Pilot chart of the White Sea. Leningrad: Min. oborony SSSR, GUNiO, 1983. No. 4766. 344 p. (In Russ.)

Terskii P. N., Gorin S. L., Panchenko E. D., Alabyan A. M., Akhmerova N. D., Vasilenko A. N., Ivanov V. A., Krastyn E. A., Kulikova Zh. M., Migunov D. A., Popryadukhin A. A., Fatkhi M. O., Kharlamov M. A. The tidal estuary of the Varzuga River (Russian subarctic): first information about the winter hydrological regime. *Water Resources*. 2024;51(1):1–11. doi: 10.1134/S0097807823700677

Terskii P. N., Panchenko E. D., Agafonova S. A., Vasilenko A. N., Kulikova Z. M., Popryadukhin A. A., Alabyan A. M., Gorin S. L. Investigation of winter regime of the White Sea estuaries in 2017–2020. *Oceanology*. 2021;61(6):1076–1078. doi: 10.1134/S0001437021060163

The second assessment report of the Roshydromet on climate change and its consequences in the Russian Federation. Moscow: Roshydromet; 2014. 58 p. (In Russ.)

Weather and climate. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (accessed: 05.08.2025).

Weather schedule. URL: <https://rp5.ru/> (accessed: 05.08.2025).

Zyryanov V. N., Chebanova M. K. Hydrodynamic effects at the entry of tidal waves into estuaries. *Water Resources*. 2016;43(4):621–628. doi: 10.1134/S0097807816040187

*Поступила в редакцию / received: 09.06.2025; принята к публикации / accepted: 28.08.2025.*  
*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Здоровеннов Роман Эдуардович**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: romga74@gmail.com*

### **Здоровеннова Галина Эдуардовна**

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник,  
руководитель лаборатории гидрофизики

*e-mail: zdorovennova@gmail.com*

### **Толстиков Алексей Владимирович**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник,  
руководитель лаборатории географии и гидрологии

*e-mail: alexeytolstikov@mail.ru*

### **Новикова Юлия Сергеевна**

аспирант, младший научный сотрудник

*e-mail: novyuliana@gmail.com*

### **Богданов Сергей Рэмович**

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

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

### **Лукина Юлия Николаевна**

д-р биол. наук, директор

*e-mail: jlukina@list.ru*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Zdorovennov, Roman**

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

### **Zdorovennova, Galina**

Cand. Sci. (Geog.), Leading Researcher,  
Head of Hydrophysics Laboratory

### **Tolstikov, Alexey**

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher,  
Head of Geography and Hydrology Laboratory

### **Novikova, Iuliia**

Doctoral Student, Junior Researcher

### **Bogdanov, Sergey**

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

### **Lukina, Yulia**

Dr. Sci. (Biol.), Director

УДК 556.551

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ДИФфуЗНОЙ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА, НА ВОДОСБОРАХ КУЙБЫШЕВСКОГО И НИЖНЕКАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ В ГРАНИЦАХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Е. А. Минакова<sup>1\*</sup>, А. П. Шлычков<sup>1</sup>, С. А. Кондратьев<sup>2</sup>,  
В. З. Латыпова<sup>3</sup>, Д. А. Минакова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет (ул. Кремлевская, 18, корп. 1, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008), \*ekologyhel@mail.ru

<sup>2</sup> Институт озераведения РАН – СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105)

<sup>3</sup> Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087)

Приводятся результаты количественной оценки диффузной биогенной нагрузки, обусловленной воздействием сельскохозяйственной деятельности на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан за период 2001–2019 гг. Изучена динамика внесения под урожай органических и минеральных азотных и фосфорных удобрений на водосборах, а также выявлен тренд снижения их внесения, в среднем составляющий 72,2 тыс. т N/год и 28,5 тыс. т P/год. Выявлена тенденция снижения поголовья КРС, овец и коз, свиней, лошадей и тенденция роста поголовья птицы в хозяйствах всех категорий на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ за исследуемый период. Рассчитана нагрузка азота и фосфора, обусловленная производством продукции животноводства. В среднем за рассматриваемый период поступление на водосбор составило 51,9 тыс. т N и 26,4 тыс. т P в год. Рассчитана доля вклада основных отраслей животноводства в совокупную биогенную нагрузку на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ. Установлено, что наибольшую нагрузку на указанных водосборах среди всех отраслей животноводства вносит скотоводство (82 % для N и 81 % для P).

Ключевые слова: водохранилище; водосбор; внешняя биогенная нагрузка; азот; фосфор; организованные и диффузные источники

Для цитирования: Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Латыпова В. З., Минакова Д. А. Количественная оценка диффузной биогенной нагрузки, обусловленной воздействием сельского хозяйства, на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 57–69. doi: 10.17076/lim2069

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан.

**E. A. Minakova<sup>1\*</sup>, A. P. Shlychkov<sup>1</sup>, S. A. Kondratyev<sup>2</sup>, V. Z. Latypova<sup>3</sup>, D. A. Minakova<sup>1</sup>. QUANTIFICATION OF DIFFUSE NUTRIENT LOAD FROM AGRICULTURE ON THE CATCHMENTS OF THE KUIBYSHEV AND NIZHNEKAMSK STORAGE RESERVOIRS WITHIN THE REPUBLIC OF TATARSTAN**

<sup>1</sup>Kazan (Volga Region) Federal University (18-1 Kremlevskaya St., 420008 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia), \*ekologyhel@mail.ru

<sup>2</sup>Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia)

<sup>3</sup>Institute of Ecology and Subsoil Use, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan (28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)

The paper takes the Kuibyshev and Nizhnekamsk storage reservoirs within the Republic of Tatarstan as case studies of complex man-altered lowland water systems in European Russia under modern natural and anthropogenic changes. We present a quantification of the diffuse nutrient load from agricultural activities in the catchments of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan for the 2001–2019 period. Having studied the dynamics of organic and mineral nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilizer use in crop production in the catchments, we revealed a trend for their reduced application, amounting to 72.2 thousand tons N/year and 28.5 thousand tons P/year. Livestock numbers in animal farms of all categories was studied. During the study period, the numbers of cattle, sheep, goats, pigs, and horses tended to decrease while poultry numbers increased in farms of all categories in the catchments of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the Republic of Tatarstan. The N and P load caused by livestock production was estimated. The average input to the catchments during the study period amounted to 51.9 thousand tons N/year and 26.4 thousand tons P/year. Estimation of the contributions of the main types of animal husbandry to the total N and P load in the catchments of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within Tatarstan showed that the main contributor was cattle farming (82 % for N and 81 % for P).

**Keywords:** storage reservoir; catchment area; exogenous nutrient load; nitrogen; phosphorus; point and non-point sources

**For citation:** Minakova E. A., Shlychkov A. P., Kondratyev S. A., Latypova V. Z., Minakova D. A. Quantification of diffuse nutrient load from agriculture on the catchments of the Kuibyshev and Nizhnekamsk storage reservoirs within the Republic of Tatarstan. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 57–69. doi: 10.17076/lim2069

**Funding.** The research was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to young Candidates of Science (Postdoctoral Students) for defending doctoral dissertation, carrying out research work, and performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan.

## **Введение**

Процесс эвтрофирования водных объектов является глобальной проблемой современности. Развитие природного эвтрофирования оценивается в рамках геологических масштабов времени, когда водоемы из олиготрофных постепенно превращаются в эвтрофные и

по мере накопления донных отложений, уменьшения глубины, развития восстановительных условий в придонных слоях зарастают [Кондратьев и др., 2010]. Антропогенные факторы, воздействующие на водные системы наряду с естественными факторами, многократно ускоряют процессы протекания естественного природного эвтрофирования с миллионов или тысяч лет

до нескольких десятилетий [Хендерсон-Селлерс и др., 1990; Кондратьев, Шмакова, 2018]. Впервые на международном уровне проблемы эвтрофирования природных вод выступили предметом специального обсуждения на Конференции ООН по водным ресурсам [1977], а в 1984 г. на XXII сессии ЮНЕП ООН процесс антропогенного эвтрофирования определен лидирующим по степени опасности воздействия на окружающую среду [Хрисанов, Осипов, 1993]. Основной причиной антропогенного эвтрофирования водных объектов является избыточное поступление биогенных элементов [Schindler, 1974; Шилькрот, 1975; Авакян и др., 1987]. Исследования, основанные на обобщении данных мониторинга, убедительно подтвердили ведущую роль азота и фосфора в эвтрофировании водоемов мира [Даченко, 2007; Науменко, 2007].

Эвтрофирование является наиболее значимой проблемой водохранилищ, вызванной биогенным загрязнением, ведущим к ухудшению качества воды водохранилищ как источников водоснабжения. Привнесение биогенных элементов в условиях замедленного водообмена вызывает массовое развитие сине-зеленых водорослей, что значительно ухудшает качество воды, снижает рекреационный и рыбохозяйственный потенциал водохранилищ. По оценкам отечественных ученых, величина поступления биогенных элементов от внешних диффузных источников в водные объекты в бассейне р. Волги и в других хозяйственно освоенных речных бассейнах России многократно превосходит поступление от организованных источников [Поздняков и др., 2019]. Исследования, проведенные Институтом водных проблем РАН (ФГБУН ИВП РАН) в рамках программы «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» при участии ведущих экспертов Института озераведения РАН – обособленного структурного подразделения Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН (ФГБУН ИНОЗ РАН), Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (ИАЭП), Казанского (Приволжского) федерального университета (ФГАОУ ВО К(П)ФУ), показали, что доля диффузного загрязнения в бассейне р. Волги по отдельным регионам колеблется от 40 до 90 % общей антропогенной нагрузки [Минакова и др., 2004, 2022; Кирпичникова, Курбатова, 2017; Брюханов и др., 2018; Поздняков и др., 2019, 2020; Минакова, 2020; Фашевская и др., 2020].

Изучение сельскохозяйственной деятельности с геохимических позиций как источника

загрязнения водных систем ведется с конца XX – начала XXI века [Саеи и др., 1990]. Поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий, животноводческих ферм и комплексов является одним из основных источников биогенной диффузной нагрузки на водные объекты [Борисова, 2002].

Цель настоящей работы – количественная оценка специфики формирования биогенной нагрузки со стороны сельского хозяйства на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан (РТ).

## Материалы и методы

Объектом исследования является сложная антропогенно нарушенная водная система равнинных водохранилищ европейской части России на примере Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ в современных изменяющихся природно-антропогенных условиях. Выбор данных водосборов в качестве объекта исследования для изучения формирования внешней биогенной нагрузки и разработки водоохраных мероприятий по снижению антропогенного эвтрофирования обусловлен их важным социально-экономическим значением.

В качестве исходной информации использованы следующие источники:

- статистические справочники Министерства сельского хозяйства и продовольствия РТ;
- статистические справочники Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по РТ о поголовье сельскохозяйственных животных и Министерства экологии и природных ресурсов РТ об образовании массы побочных продуктов при содержании сельскохозяйственных животных.

Суммарная нагрузка биогенных элементов на водный объект формируется из двух составляющих (рис. 1):

- внутренняя биогенная нагрузка (автохтонная);
- внешняя нагрузка (аллохтонная).

Внутренняя биогенная нагрузка формируется за счет вторичного загрязнения путем поступления в водный объект минеральных форм биогенных элементов из донных отложений с последующим вовлечением их в биотический круговорот и в поверхностные воды [Даченко, 2007]. Внешняя биогенная нагрузка формируется за счет выноса химических веществ с водосбора водного объекта в результате воздействия природных и антропогенных факторов [Кондратьев, 2007; Кондратьев, Шмакова, 2019].



Рис. 1. Формирование биогенной нагрузки на водные объекты [Минакова и др., 2023]

Fig. 1. Formation of nutrient load on water bodies [Minakova et al., 2023]

Эвтрофирование в большей части определяется не содержанием биогенных элементов в водном объекте, а скоростью поступления их извне [Россолимо, 1977]. Водосбор является геохимическим барьером на пути миграции в водный объект ряда веществ, в том числе и биогенных элементов. Геохимические барьеры [Перельман, 1975, 1982] рассматриваются как участки земной коры, где на ограниченном расстоянии происходит резкое снижение интенсивности миграции химических элементов. Поступившие на водосбор биогенные элементы претерпевают процессы трансформации и нейтрализации. Часть биогенных элементов не достигает замыкающих створов крупных водных объектов, так как удерживается на водосборе за счет действия различных факторов. Внешняя нагрузка на водные объекты является постоянно действующим фактором, определяющим качество поверхностных вод и влияющим на химический состав донных отложений [Ершова, 2013]. Согласно современным научным воззрениям [Ясинский, Гуров, 2006; Науменко, 2007; Кондратьев, 2007; Фрумин, 2013; Ясинский и др., 2020], основное внимание в первую очередь следует сосредоточить на изучении внешней биогенной нагрузки на водосборе.

Оценка внешней биогенной нагрузки на водные объекты представляет собой сложную задачу. Для расчета внешней биогенной нагрузки на водные объекты в работе использована усовершенствованная модель выноса растворенных примесей с водосбора и формирования внешней нагрузки на водный объект ILLM (Institute of Limnology Load Model) [Свидетельство..., 2014]. Основу модели составляет системный анализ, как один из наиболее перспективных методов оценки внешней биогенной нагрузки бассейнов речных геосистем, основанный на синтезе геоситуационной концепции и ландшафтно-экологического подхода [Исаченко, 1980], базирующийся на математическом моделировании природных процессов,

принципах геоэкологической оценки качества окружающей среды и рационального природопользования природно-антропогенных объектов и процессов. Используемая в настоящей работе модель ILLM является промежуточным вариантом между эмпирическими моделями с сосредоточенными параметрами и физико-математическими моделями с распределенными параметрами [Кондратьев, Шмакова, 2019].

Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой внешней нагрузки на водные объекты, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения и прогнозом ее изменения под влиянием возможных природно-антропогенных факторов. Модель учитывает вклад организованных и диффузных источников в формирование биогенной нагрузки на водосборе, позволяет рассчитывать вынос элементов с водосбора в водный объект с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью [Поздняков и др., 2019, 2020]. В используемой версии модели для оценки биогенной нагрузки, сформированной на сельскохозяйственных угодьях, применен метод, предложенный специалистами ИАЭП [Брюханов и др., 2016, 2018; Поздняков и др., 2016]. Метод позволяет проводить расчет выноса биогенных элементов с учетом доз внесения удобрений, типов почв, слагающих сельскохозяйственный водосбор, их механического состава, удаленности поля от водного объекта.

Модель имеет модульную структуру. Согласно принятой в модели схеме расчета основными составляющими внешней биогенной нагрузки на водный объект являются: диффузная природная биогенная нагрузка с подстилающей поверхности различных типов естественных ландшафтов; диффузная антропогенная биогенная нагрузка; удержание биогенных элементов водосбором и его гидрографической сетью; сбросы организованных источников

непосредственно в водный объект [Минакова и др., 2022, 2023]. Конечный итог моделирования – количественная оценка внешней биогенной нагрузки на водные объекты и отдельных ее составляющих.

В соответствии с требованиями решаемой задачи модель ILLM была усовершенствована путем включения в нее новых расчетных модулей [Минакова и др., 2023]:

- «массообмен с атмосферой» для оценки атмосферных выпадений биогенных элементов;

- «расчет нагрузки, сформированной расщепленным стоком с урбанизированных территорий», обусловленной поступлением биогенных элементов от городского и сельского населения.

В общем виде модель представлена следующей формулой [Кондратьев, 2007; Кондратьев и др., 2011, 2015]:

$$L = (L_{nat\ diff} + L_{antr\ diff}) (1 - k_r) + L_{w1},$$

где  $L$  – внешняя биогенная нагрузка на водный объект, т/год;

$L_{nat\ diff}$  – диффузная природная биогенная нагрузка с подстилающей поверхности различных типов естественных ландшафтов, т/год;

$L_{antr\ diff}$  – диффузная антропогенная биогенная нагрузка, т/год;

$k_r$  – коэффициент удержания вещества водосбором и его гидрографической сетью;

$L_{w1}$  – сбросы организованных источников непосредственно в водный объект, т/год.

Схема усовершенствованной модели ILLM, используемой для расчета внешней биогенной нагрузки на водные объекты в настоящем исследовании, приведена на рис. 2 [Минакова и др., 2022].

Выбор модели ILLM обусловлен наличием модульной структуры, позволяющей учитывать вновь выявленные факторы диффузной нагрузки. Применение модели ILLM позволяет компенсировать отсутствующий в настоящее время мониторинг диффузной нагрузки

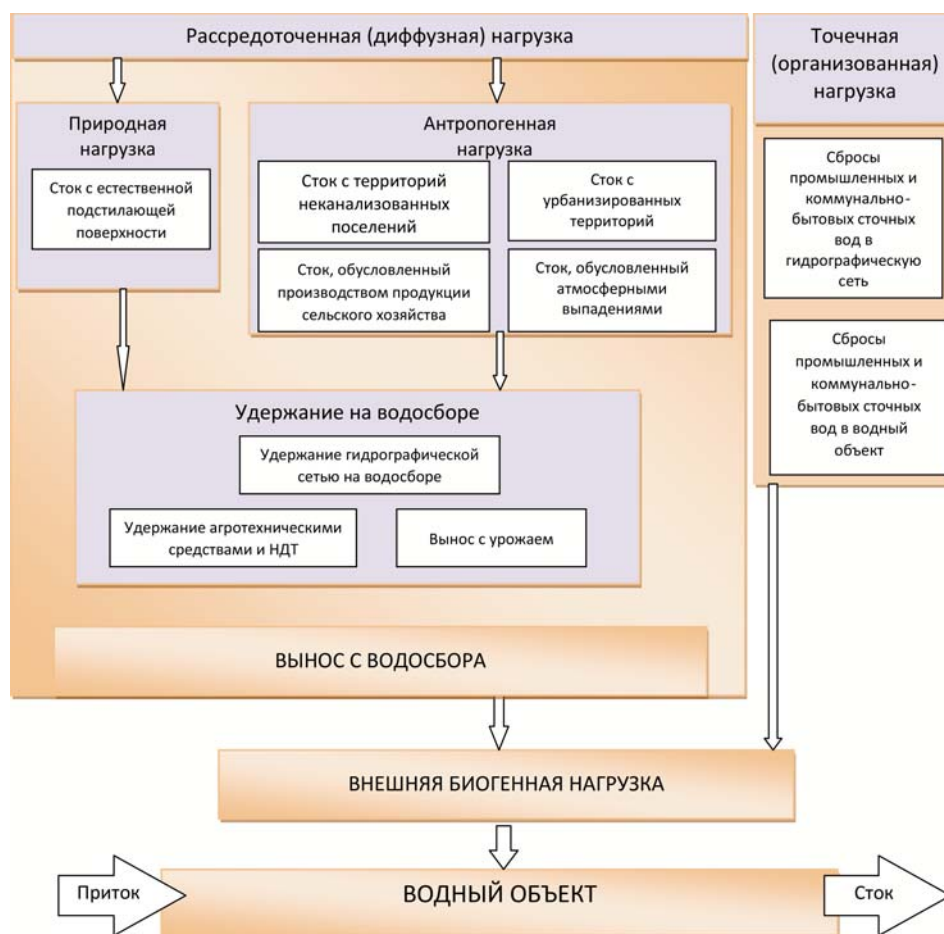


Рис. 2. Схема усовершенствованной математической модели ILLM [Минакова и др., 2022]

Fig. 2. Scheme of the improved mathematical model ILLM [Minakova et al., 2022]

на водные объекты, опираясь на имеющуюся информацию (данные дистанционного зондирования земли, статистические справочники, ведомственные материалы, данные об инвентаризации диффузных источников и др.) об основных источниках нагрузки на водосборе. Модель ориентирована на данные, приведенные в официальных источниках и формах государственной статистической отчетности министерств и ведомств РФ (государственный мониторинг водных объектов, статистическая отчетность о сбросах сточных вод, данные о сельскохозяйственной деятельности на водосборах) [Кондратьев и др., 2010]. Модель ILLM прошла опробование и верификацию на ряде объектов, расположенных в северо-западной части европейской территории РФ (оз. Ладожское и реки Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка), а также в Западной Сибири (реки Иртыш, Тобол, Ишим, Омь, Конда) [Кондратьев и др., 2010, 2011, 2024; Кондратьев, Шмакова, 2019].

Расчеты выноса химических элементов с водосбора и формирование внешней нагрузки на водные объекты в модели могут выполняться как с годовым, так и с месячным шагами по времени. Ввиду того что модель ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения [Кондратьев и др., 2010] некоторой части входных данных, имеющих годовое осреднение, в качестве расчетного интервала в настоящей работе принят 1 год.

Для информационного обеспечения исследования создана база данных «Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан», содержащая информацию о природных и антропогенных факторах, обуславливающих формирование внешней биогенной нагрузки (природно-климатические условия, гидрологический и гидрохимический режим, источники точечной и диффузной биогенной нагрузки), а также материалы проведенной количественной оценки с использованием усовершенствованной модели ILLM основных составляющих внешней биогенной нагрузки на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ за период 2001–2019 гг. [Свидетельство..., 2024].

Численность сельскохозяйственных животных поголовья КРС, свиней, овец и коз, лошадей и птицы в хозяйствах всех категорий РТ определялась в разрезе муниципальных образований.

Оценка внешней нагрузки, обусловленной побочными продуктами животноводства ( $L_i$ ), на водосборную площадь водохранилищ выполнена

с учетом рекомендаций, приведенных в [Кондратьев и др., 2010] по формуле:

$$L_i = \sum_{i=1}^{n_i} 1000 k_{ji} N_i, \quad (1)$$

где  $k_{ji}$  – коэффициент эмиссии фосфора или азота  $i$ -го сельскохозяйственного животного,  $\text{кг} \times \text{год}^{-1}$ ;  $N_i$  – количество сельскохозяйственных животных.

Расчет коэффициентов эмиссии азота и фосфора выполнен с использованием данных об их процентном содержании в побочных продуктах сельскохозяйственных животных, приведенных в [Васильев, Филиппова, 1988], и сведений об образовании массы побочных продуктов сельскохозяйственных животных, представленных в [Государственный..., 2013].

Для получения достоверных статистических характеристик обработка исходных данных проводилась в соответствии с рекомендациями, приведенными в [Пановский, Брайер, 1972; Методические..., 1987; Исаев, 1988; Кобышева, Гольберг, 1990; Лакин, 1990].

## Результаты и обсуждение

В работе исследована динамика и определен тренд внесения под урожай органических и минеральных азотных и фосфорных удобрений, а также образования побочных продуктов животноводства на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ за период 2001–2019 гг. В качестве биогенных элементов рассмотрены соединения азота в пересчете на азот общий (N) и соединения фосфора в пересчете на фосфор общий (P). Эти биогенные элементы входят в Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (утвержден Распоряжением Правительства РФ от 23.12.2023 № 3885-р, от 05.06.2024 № 1415-р).

Динамика и тренд внесения под урожай органических и минеральных азотных и фосфорных удобрений на указанных водосборах приведены на рис. 3 и 4. Анализ данных рис. 3 показал тенденцию снижения за исследуемый период внесения под урожай азотных удобрений. Максимальное его значение составило 156,9 тыс. т, минимальное – 84,7 тыс. т. В среднем за рассматриваемый период в год под урожай вносилось 123,5 тыс. т, а общее снижение составило 72,2 тыс. т. Данные на рис. 4 свидетельствуют об аналогичной тенденции для органических и минеральных фосфорных удобрений. Максимальное значение их внесения за рассматриваемый период – 54,2 тыс. т,

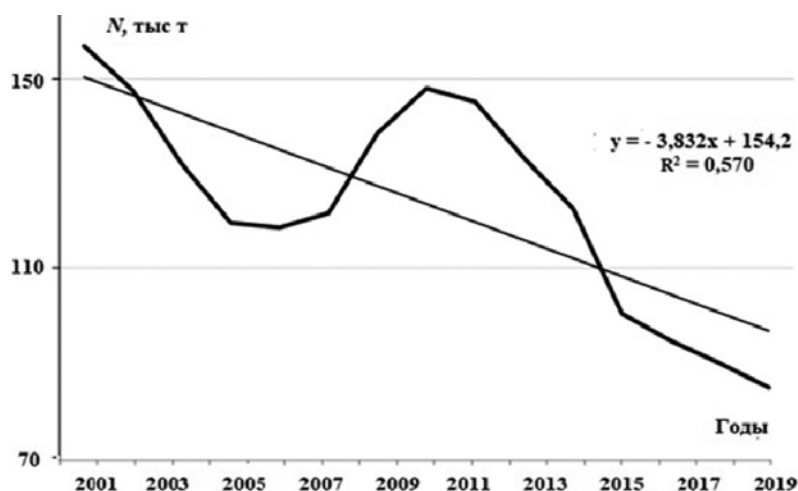


Рис. 3. Динамика и тренд внесения под урожай органических и минеральных азотных удобрений на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ, тыс. т

Fig. 3. Dynamics and trend of application of organic and mineral nitrogen fertilizers for crops in the catchment areas of the Kuibyshev and Nizhnekamsk Reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan, thousand tons

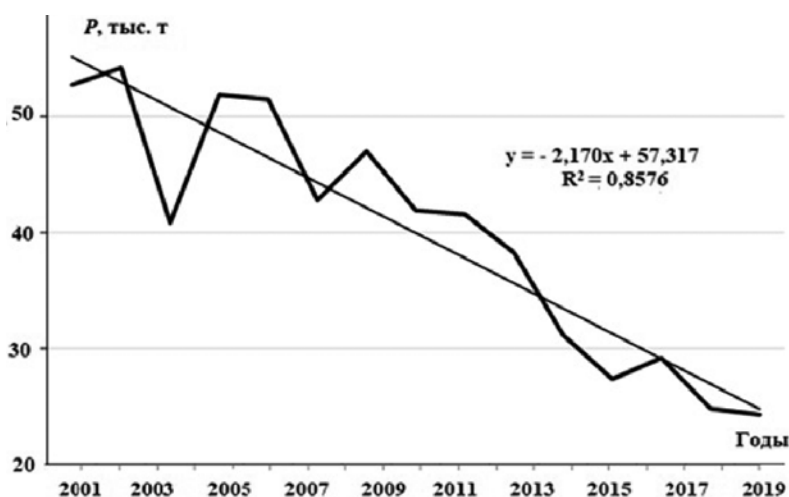


Рис. 4. Динамика и тренд внесения под урожай органических и минеральных фосфорных удобрений на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ, тыс. т

Fig. 4. Dynamics and trend of application of organic and mineral phosphorus fertilizers for crops in the catchment areas of the Kuibyshev and Nizhnekamsk Reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan, thousand tons

наименьшее – 24,3 тыс. т. В среднем в год под урожай вносилось по 40,0 тыс. т органических и минеральных фосфорных удобрений, а общее снижение составило 28,5 тыс. т.

Проанализированы сведения о численности сельскохозяйственных животных в скотоводческих хозяйствах всех категорий на изученной территории. Результаты, приведенные в таблице, демонстрируют снижение за исследуемый

период поголовья сельскохозяйственных животных в скотоводческих хозяйствах всех категорий: КРС – в 1,2 раза, свиней, овец и коз – в 1,5 раза, лошадей в 2 раза; одновременно отмечался рост поголовья птицы в 2,5 раза.

С использованием формулы (1) на основе информации о поголовье сельскохозяйственных животных, а также о массе образования побочных продуктов животноводства рассчитана

Поголовье сельскохозяйственных животных на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ

Livestock population in the catchment areas of the Kuibyshev and Nizhnekamsk Reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan

| Наименование домашних животных<br>Name of domestic animals | Поголовье домашних животных, тыс. голов<br>Livestock population, thousand heads |         |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|
|                                                            | 2001 г.                                                                         | 2019 г. |
| КРС<br>cattle                                              | 1194,6                                                                          | 978,0   |
| свиньи<br>pigs                                             | 749,6                                                                           | 489,1   |
| овцы и козы<br>sheep and goats                             | 475,6                                                                           | 316,3   |
| лошади<br>horses                                           | 61,0                                                                            | 31,0    |
| птица<br>poultry                                           | 7128,1                                                                          | 17795,1 |

нагрузка N и P на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ, выявлена динамика и тренд нагрузки. Так, за исследуемый период наблюдалась тенденция снижения нагрузки азота и фосфора, обусловленной производством продукции животноводства. Наибольшая величина составила соответственно 55,8 и 27,9, а наименьшая – 47,4 и 24,7 тыс. т. В среднем за рассматриваемый период поступление азота и фосфора на водосбор составило

соответственно 51,9 и 26,4 тыс. т/год, а общее снижение – 7,8 и 3,0 тыс. т/год.

Рассчитана доля вклада основных отраслей животноводства в совокупную биогенную нагрузку на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ. Результаты представлены на рис. 5 и 6. Анализ данных показывает, что основную нагрузку азота и фосфора среди отраслей животноводства вносит скотоводство (82,3 % для N и 81,0 % для P), совокупный вклад свиноводства, овцеводства, коневодства и птицеводства составляет 18 % для N и 19 % для P.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ за период 2001–2019 гг. в среднем под урожай вносились органические и минеральные азотные удобрения в количестве 123,5 тыс. т N/год и фосфорные удобрения в количестве 40,0 тыс. т P/год. Выявлен тренд снижения внесения этих видов удобрений, в среднем составляющий 72,2 тыс. т азота и 28,5 тыс. т фосфора в год.

Изучение численности сельскохозяйственных животных в скотоводческих хозяйствах всех категорий на указанных водосборах выявило тенденцию снижения поголовья КРС, овец и коз, свиней, лошадей и тенденцию роста поголовья птицы за исследуемый период.

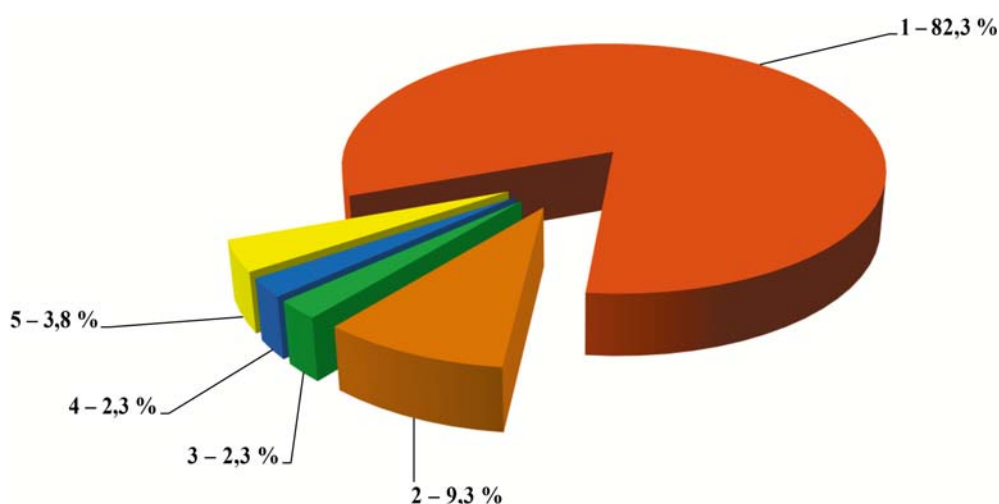


Рис. 5. Вклад отраслей животноводства в совокупную нагрузку азота на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ:

1 – скотоводство, 2 – свиноводство, 3 – овцеводство, 4 – коневодство, 5 – птицеводство

Fig. 5. Contribution of livestock industries to the total N load in the catchments of the Kuibyshev and Nizhnekamsk Reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan:

1 – cattle breeding, 2 – pig breeding, 3 – sheep breeding, 4 – horse breeding, 5 – poultry farming

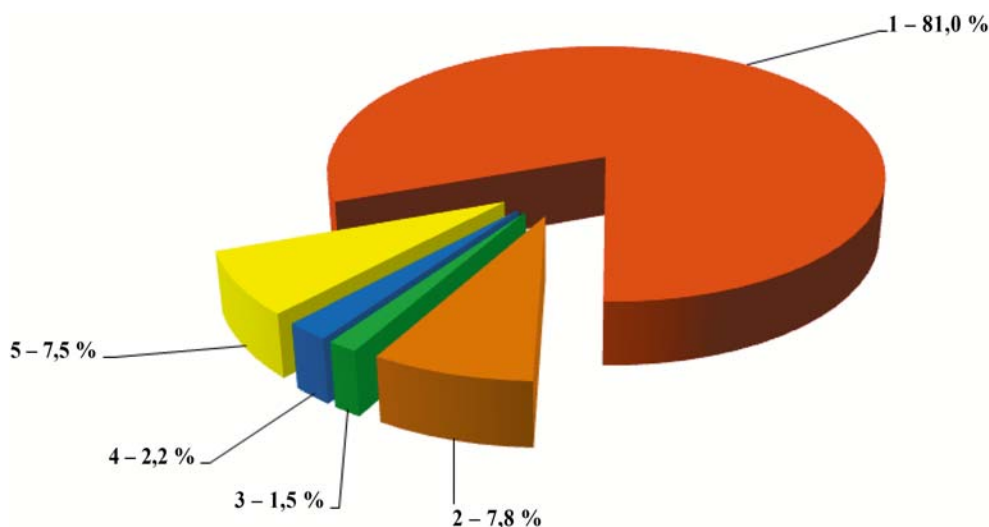


Рис. 6. Вклад отраслей животноводства в совокупную нагрузку фосфора на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ:

1 – скотоводство, 2 – свиноводство, 3 – овцеводство, 4 – коневодство, 5 – птицеводство

Fig. 6. Contribution of livestock industries to the total P load in the catchments of the Kuybyshev and Nizhnekamsk Reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan:

1 – cattle breeding, 2 – pig breeding, 3 – sheep breeding, 4 – horse breeding, 5 – poultry farming

Сокращение поголовья сельскохозяйственных животных в скотоводческих хозяйствах всех категорий РТ составило: КРС – в 1,2 раза; свиней, овец и коз – в 1,5 раза; лошадей – в 2 раза. Отмечен рост поголовья птицы в 2,5 раза.

Рассчитанная нагрузка N и P, обусловленная производством продукции животноводства на изученной территории, в среднем за рассматриваемый период составила 51,9 тыс. т азота и 26,4 тыс. т фосфора в год. Выявлена тенденция ее снижения, в среднем составляющая 7,8 тыс. т азота и 3,0 тыс. т фосфора в год.

При расчете доли вклада основных отраслей животноводства в совокупную биогенную нагрузку азота и фосфора на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ установлено, что наибольший вклад вносит скотоводство (82,3 % для N и 81,0 % для P), суммарная доля свиноводства, овцеводства и коневодства составляет 18 и 19 % для N и P соответственно.

## Литература

Авакян А. Б., Салтанкин В. П., Шарапов В. А. Водохранилища. М.: Мысль, 1987. 325 с.

Борисова Г. Г. Геоэкологические основы управления диффузным стоком с сельскохозяйственных водосборов: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Екатеринбург, 2002. 46 с.

Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Обломкова Н. С., Оглуздин А. С., Субботин И. А. Методика

определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175–183.

Брюханов А. Ю., Терехов А. В., Васильев Э. В., Минакова Е. А., Терехов А. В., Обломкова Н. С. Оценка сельскохозяйственной биогенной нагрузки, сформированной на речных водосборах бассейна Куйбышевского водохранилища // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства. 2018. № 3(96). С. 175–186. doi: 10.24411/0131-5226-2018-100571

Васильев В. А., Филиппова Н. В. Справочник по органическим удобрениям. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Росагропромиздат, 1988. 255 с.

Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Татарстан в 2012 году». Казань, 2013. 500 с.

Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 232 с.

Ершова А. А. Комплексная оценка поступления биогенных веществ с водосбора реки Нева в восточную часть Финского залива: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2013. 28 с.

Исаев А. А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 245 с.

Исаченко А. Г. Методы прикладных ландшафтных исследований. М.: Наука, 1980. 263 с.

Кирпичникова Н. В., Курбатова И. Е. Деградация водоохранных зон источников водоснабжения: водное законодательство, экологический мониторинг, дистанционные методы оценки // Водные ресурсы:

новые вызовы и пути решения: Сб. науч. трудов, посвящ. Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН (Сочи, 2–7 октября 2017 г.). Сочи: Лик, 2017. С. 576–581.

Кобышева Н. В., Гольберг М. А. Методические указания по статистической обработке метеорологических рядов. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 85 с.

Кондратьев С. А., Брюханов А. Ю., Поздняков Ш. Р., Пузанов А. В., Жерелина И. В., Шмакова М. В., Васильев Э. В., Расулова А. М., Бабошкина С. В., Обломкова Н. С. Оценка нагрузки биогенными и загрязняющими веществами на российскую часть р. Иртыш // География и природные ресурсы. 2024. Т. 45, № 1. С. 41–53. doi: 10.15372/GIPR20240104

Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С., Рябченко В. А., Дворников А. Ю. Моделирование абiotических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб.: Нестор-История, 2010. 116 с.

Кондратьев С. А., Казмина М. В., Шмакова М. В., Маркова Е. Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты // Региональная экология. 2011. № 3–4. С. 50–59.

Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Детерминированно-стохастическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоем // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 55–65. doi: 10.7868/S207366731804007X

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Детерминированно-стохастическое моделирование изменений стока и биогенной нагрузки под воздействием климата // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: Мат-лы междунар. науч. конф. (Минск, 5–8 мая 2015 г.). Минск: БГУ, 2015. С. 256–258.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоток-водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.

Конференция ООН по водным ресурсам (Мардель-Плата, Аргентина, 14–25 марта 1977 г.). Нью-Йорк, 1977. 28 с.

Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 207 с.

Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А. В. Караушева. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 286 с.

Минакова Е. А., Латыпова В. З., Степанова Н. Ю. Экологическое нормирование антропогенных нагрузок на водные экосистемы // Экологический консалтинг. 2004. № 4(16). С. 3–10.

Минакова Е. А. Основные факторы формирования качества поверхностных вод Республики Татарстан (на примере рек Казанка, Свияга, Степной Зай). Казань: Фолиант, 2020. 184 с.

Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Латыпова В. З. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме «водосбор – водный объект» в современных условиях // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 2. С. 13–21. doi: 10.24412/1816-1863-2022-2-13-21

Минакова Е. А., Шлычков А. П., Леонова Т. Ш., Латыпова В. З., Минакова Д. А. Особенности распределения внешней биогенной нагрузки на водные объекты в различных физико-географических районах Республики Татарстан // Экология урбанизированных территорий. 2023. № 1. С. 33–37. doi: 10.24412/1816-1863-2023-1-33-37

Науменко М. А. Эвтрофирование озер и водохранилищ. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2007. 100 с.

Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 200 с.

Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.

Перельман А. И. Геохимия природных вод. М.: Наука, 1982. 150 с.

Поздняков Ш. Р., Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Игнатьева Н. В., Шмакова М. В., Минакова Е. А., Расулова А. М., Обломкова Н. С., Васильев Э. В., Терехов А. В. Перспективы сокращения выноса биогенных элементов с речных водосборов за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) сельскохозяйственного производства (по результатам моделирования) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 588–602. doi: 10.31857/S0321059620050168

Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А., Минакова Е. А., Брюханов А. Ю., Игнатьева Н. В., Шмакова М. В., Иванова Е. В., Обломкова Н. С., Терехов А. В. Оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 67–76. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(67-76)

Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А., Тарбаева В. М., Шмакова М. В., Брюханов А. Ю., Воробьева Е. А., Обломкова Н. С. Обоснование выполнения рекомендаций ХЕЛКОМ по снижению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России // Вестник СПбГУ. Сер. 7. География. География. 2016. Вып. 4. С. 53–65. doi: 10.21638/11701/spbu07.2016.405

Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 205 с.

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.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623845 «Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан» / Е. А. Минакова; правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (RU). Заявка № 2024623515; заявл. 13.08.2024, дата государственной регистрации в Реестре баз данных 30.08.2024.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614210 РФ. Расчет формирования стока на водосборе на основе модели ILLM / Кондратьев С. А., Шмакова М. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озероведения РАН (ИНОЗ РАН). Заявка № 2014664208; заявл. 31.12.2014; опубл. 09.04.2015.

Хендерсон-Селлерс Б., Марклэнд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 278 с.

Хрисанов Н. И., Осипов Г. К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 278 с.

Шилькрот Г. С. Причины антропогенного эвтрофирования водоемов // Общая экология. Биогеоэкология. Гидробиология. Т. 2: Антропогенное эвтрофирование водоемов. М., 1975. С. 61–99.

Фашчевская Т. Б., Полянин В. О., Кирпичникова Н. В. Диффузное загрязнение водных объектов: источники, мониторинг, водоохранные мероприятия. М.: ИВП РАН, 2020. 171 с.

Фрумин Г. Т. Расчет модулей фонового стока биогенных элементов с водосборных бассейнов. СПб.: РГГМУ, 2013. 32 с.

Ясинский С. В., Гуров Ф. Н. Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) // Водное хозяйство России. 2006. № 2. С. 63–91.

Ясинский С. В., Кашутина Е. А., Сидорова М. В., Нарыков А. Н. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 630–648. doi: 10.31857/S0321059620050223

Schindler D. W. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management // Science. 1974. No. 174. P. 897–899. doi: 10.1126/science.184.4139.897

## References

Avakyan A. B., Saltankin V. P., Sharapov V. A. Reservoirs. Moscow: Mysl'; 1987. 325 p. (In Russ.)

Borisova G. G. Geoecological foundations of diffuse runoff management from agricultural catchments: Summary of DSc (Dr. of Geog.) thesis. Ekaterinburg; 2002. 46 p. (In Russ.)

Bryukhanov A. Yu., Kondrat'ev S. A., Oblomkova N. S., Ogluzdin A. S., Subbotin I. A. Methodology for determining the nutrient load of agricultural production on water bodies. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products*. 2016;89:175–183. (In Russ.)

Bryukhanov A. Yu., Terekhov A. V., Vasil'ev E. V., Minakova E. A., Terekhov A. V., Oblomkova N. S. Assessment of agricultural nutrient load generated on the river catchment areas within the Kuybyshev Reservoir basin. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva = Technologies and technical means of mechanized production of crop products*. 2018;3(96): 175–186. (In Russ.). doi: 10.24411/0131-5226-2018-100571

Certificate of the state registration of computer program No. 2015614210 RF. Calculation of runoff formation in a catchment area based on the ILLM model. Ap-

plication No. 2014664208; submitted 31.12.2014; published 09.04.2015. (In Russ.)

Certificate of the state registration of database No. 2024623845 'External biogenic load on surface waters of the Kuibyshev and Nizhnekamsk Reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan'. Application No. 2024623515; submitted 13.08.2024, date of the state registration in the Database Register 30.08.2024. (In Russ.)

Datsenko Yu. S. Eutrophication of reservoirs: hydrological and hydrochemical aspects. Moscow: GEOS; 2007. 232 p. (In Russ.)

Ershova A. A. Comprehensive assessment of the influx of biogenic substances from the Neva River catchment area into the eastern part of the Gulf of Finland: Summary of PhD (Cand. of Geog.) thesis. St. Petersburg; 2013. 28 p. (In Russ.)

Fashchevskaya T. B., Polyanin V. O., Kirpichnikova N. V. Diffuse pollution of water bodies: sources, monitoring, water protection measures. Moscow: IVP RAN; 2020. 171 p. (In Russ.)

Frumin G. T. Calculation of modules of background runoff of biogenic elements from catchment basins. St. Petersburg: RGGMU; 2013. 32 p. (In Russ.)

Henderson-Sellers B., Markland H. R. Dying lakes: causes and control of anthropogenic eutrophication. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1990. 278 p. (In Russ.)

Isachenko A. G. Applied landscape research methods. Moscow: Nauka; 1980. 263 p. (In Russ.)

Isaev A. A. Statistics in meteorology and climatology. Moscow: MGU; 1988. 245 p. (In Russ.)

Karaushev A. V. (ed.). Methodological principles for assessing anthropogenic impact on the quality of surface waters. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1987. 286 p. (In Russ.)

Khrisanov N. I., Osipov G. K. Management of water bodies eutrophication. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 1993. 278 p. (In Russ.)

Kirpichnikova N. V., Kurbatova I. E. Degradation of water protection zones of water supply sources: water legislation, environmental monitoring, remote assessment methods. *Vodnye resursy: novye vyzovy i puti resheniya: Sb. nauch. trudov, posvyashch. Godu ekologii v Rossii i 50-letiyu Instituta vodnykh problem RAN (Sochi, 2–7 oktyabrya 2017 g.) = Water resources: new challenges and solutions: Proceed. dedicated to the Year of Ecology in Russia and the 50<sup>th</sup> Anniversary of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Sochi, Oct. 2–7, 2017)*. Sochi: Lik; 2017. P. 576–581. (In Russ.)

Kobysheva N. V., Gol'berg M. A. Guidelines for statistical processing of meteorological series. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1990. 85 p. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Bryukhanov A. Yu., Pozdnyakov Sh. R., Puzanov A. V., Zherelina I. V., Shmakova M. V., Vasil'ev E. V., Rasulova A. M., Baboshkina S. V., Oblomkova N. S. Assessment of the load of nutrients and pollutants on the Russian part of the Irtysh River. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2024;45(1):41–53. (In Russ.). doi: 10.15372/GIPR20240104

Kondrat'ev S. A. Formation of external load on water bodies: problems of modeling. St. Petersburg: Nauka; 2007. 253 p. (In Russ.)

- Kondrat'ev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Ryabchenko V. A., Dvornikov A. Yu. Modeling of abiotic processes in the catchment-reservoir system (case of Lake Peipus). St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2010. 116 p. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V., Markova E. G. A method for calculating the biogenic load on water bodies. *Regional'naya ekologiya = Regional Ecology*. 2011;3-4:50-59. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V. Deterministic-stochastic modeling of mass transfer in the catchment-reservoir system. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018;11(4):55-65. (In Russ.). doi: 10.7868/S207366731804007X
- Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V. Deterministic-stochastic modeling of changes in runoff and nutrient load under the impact of climate. *Problemy gidrometeorologicheskogo obespecheniya khozyaistvennoi deyatel'nosti v usloviyakh izmenyayushche-gosyia klimata: Mat-ly mezhdunar. nauch. konf. (Minsk, 05-08 maya 2015 g.) = Issues of hydrometeorological support of economic activity in conditions of changing climate: Proceed. int. scientific conf. (Minsk, May 5-8, 2015)*. Minsk: BGU; 2015. P. 256-258. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the catchment - watercourse - reservoir system. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2019. 248 p. (In Russ.)
- Lakin G. F. Biometrics. Moscow: Vysshaya shkola; 1990. 207 p. (In Russ.)
- Minakova E. A., Latypova V. Z., Stepanova N. Yu. Environmental regulation of anthropogenic loads on aquatic ecosystems. *Ekologicheskii konsalting = Environmental Consulting*. 2004;4(16):3-10. (In Russ.)
- Minakova E. A. Main factors shaping the quality of surface waters in the Republic of Tatarstan (cases of the Kazanka, Sviyaga, Stepnoy Zay Rivers). Kazan: Foliant; 2020. 184 p. (In Russ.)
- Minakova E. A., Shlychkov A. P., Kondrat'ev S. A., Latypova V. Z. Migration flows of nutrient elements in the catchment area - water body geosystem in modern conditions. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii = Ecology of Urbanized Territories*. 2022;2:13-21. (In Russ.). doi: 10.24412/1816-1863-2022-2-13-21
- Minakova E. A., Shlychkov A. P., Leonova T. Sh., Latypova V. Z., Minakova D. A. Features of the external biogenic load distribution on water bodies in various physical and geographical regions of the Republic of Tatarstan. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii = Ecology of Urbanized Territories*. 2023;1:33-37. (In Russ.). doi: 10.24412/1816-1863-2023-1-33-37
- Naumenko M. A. Eutrophication of lakes and reservoirs. Study guide. St. Petersburg: RGGMU; 2007. 100 p. (In Russ.)
- Panofsky H. A., Brier G. W. Statistical methods in meteorology. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1972. 200 p. (In Russ.)
- Perel'man A. I. Landscape geochemistry. Moscow: Vysshaya shkola; 1975. 342 p. (In Russ.)
- Perel'man A. I. Geochemistry of natural waters. Moscow: Nauka; 1982. 150 p. (In Russ.)
- Pozdnyakov Sh. R., Bryukhanov A. Yu., Kondrat'ev S. A., Ignat'eva N. V., Shmakova M. V., Minakova E. A., Rasulova A. M., Oblomkova N. S., Vasil'ev E. V., Terekhov A. V. Prospects for reducing the removal of biogenic elements from river catchments through the introduction of the best available technologies (BAT) for agricultural production (based on modeling results). *Vodnye resursy = Water Resources*. 2020;47(5):588-602. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059620050168
- Pozdnyakov Sh. R., Kondrat'ev S. A., Minakova E. A., Bryukhanov A. Yu., Ignat'eva N. V., Shmakova M. V., Ivanova E. V., Oblomkova N. S., Terekhov A. V. Assessment of the biogenic load on the Kuibyshev Reservoir from the catchment area. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2019;3:67-76. (In Russ.). doi: 10.21782/GIPRO206-1619-2019-3(67-76)
- Pozdnyakov Sh. R., Kondrat'ev S. A., Tarbaeva V. M., Shmakova M. V., Bryukhanov A. Yu., Vorob'eva E. A., Oblomkova N. S. Scientific substantiation of the implementation of HELCOM recommendations to reduce the biogenic load on the Gulf of Finland from Russia. *Vestnik SPbGU. Ser. 7. Geologiya. Geografiya = Bulletin of St. Petersburg State University. Ser. 7. Geology. Geography*. 2016;4:53-65. (In Russ.). doi: 10.21638/11701/spbu07.2016.405
- Rossolimo L. L. Changes in limnic ecosystems under the influence of anthropogenic factors. Moscow: Nauka; 1977. 205 p. (In Russ.)
- 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.)
- Schindler D. W. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science*. 1974;174:897-899. doi: 10.1126/science.184.4139.897
- Shil'krot G. S. Causes of anthropogenic eutrophication of water bodies. *Obshchaya ekologiya. Biogeotsenologiya. Gidrobiologiya. T. 2: Antropogennoe evtrofirovanie vodoemov = General ecology. Biogeocenology. Hydrobiology. Vol. 2: Anthropogenic eutrophication of water bodies*. Moscow; 1975. P. 61-99. (In Russ.)
- State report 'On the state of natural resources and environmental protection of the Republic of Tatarstan in 2012'. Kazan; 2013. 500 p. (In Russ.)
- UN conference on water resources. Mar del Plata. Argentina. March 14-25, 1977. New York; 1977. 28 p. (In Russ.)
- Vasil'ev V. A., Filippova N. V. Handbook of organic fertilizers. Moscow: Rosagropromizdat; 1988. 255 p. (In Russ.)
- Yasinskii S. V., Gurov F. N. Method for assessing the characteristics of the diffusion of pollutants of small rivers based on the landscape-horological approach (case of the Istra River). *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Management of Russia*. 2006;2:63-91. (In Russ.)
- Yasinskii S. V., Kashutina E. A., Sidorova M. V., Narykov A. N. Anthropogenic load and the effect of drainage area on the diffuse runoff of nutrients into a large water body: case study of the Cheboksary Reservoir. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2020;47(5): 630-648. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059620050223

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Минакова Елена Анатольевна**

канд. геогр. наук, доцент

*e-mail: ekologyhel@mail.ru*

**Шлычков Анатолий Петрович**

канд. геогр. наук, доцент

*e-mail: anatoliy.shlychkov@yandex.ru*

**Кондратьев Сергей Алексеевич**

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

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

**Латыпова Венера Зиннатовна**

член-корр. АН РТ, д-р хим. наук, профессор

*e-mail: ecoanrt@yandex.ru*

**Минакова Дарья Александровна**

магистрант

*e-mail: lfieyz007@mail.ru*

#### **CONTRIBUTORS:**

**Minakova, Elena**

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor

**Shlychkov, Anatoly**

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor

**Kondratyev, Sergey**

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

**Latypova, Venera**

Corresponding Fellow of the Academy of Sciences  
of the Republic of Tatarstan, Dr. Sci. (Chem.), Professor

**Minakova, Dar'ya**

Master's Student

УДК 556.114.7:556.55

## ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ И АККУМУЛЯЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР – ОТЧЛЕНЕННЫХ ЗАЛИВОВ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

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

*Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан  
(ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087), \*Irek.Ziganshin@tatar.ru*

В контексте глобальных климатических изменений, вызванных ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, особую актуальность приобретают исследования процессов депонирования углерода в природных средах. Значительную роль в глобальном углеродном цикле играют донные отложения водоемов, выступающие в качестве долговременных хранилищ органического вещества. В статье приводятся результаты исследования процессов осадконакопления и аккумуляции углерода в донных отложениях 12 озер, образованных при отчленении заливов Куйбышевского водохранилища в пределах Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника и его охранной зоны (Средняя Волга, Республика Татарстан). Установлены пространственные закономерности распределения мощности донных отложений, накопленных в озерах-заливах за период с момента образования водохранилища, которая варьирует от 5 до 48 см. Показано, что скорость осадконакопления в исследуемых водоемах зависит от батиметрических особенностей их ложа и возрастает от 0,8–3,0 мм/год на участках с глубиной < 1 м до 3,9–7,2 мм/год на отметках глубин > 2 м, что в пересчете на количество вещества, ежегодно аккумулируемого на единицу площади дна, составляет 680–3186 г/м<sup>2</sup>. Содержание органического вещества в донных отложениях, представленных преимущественно песчанистыми илами и илистыми песками, относительно невысоко и изменяется от 0,2 до 12,1 %. Отмечена зависимость между глубиной водоема и скоростью аккумуляции органического углерода в озерных осадках, которая в среднем составляет 29, 53 и 66 г С/м<sup>2</sup> · год для глубин < 1 м, 1–2 м, > 2 м соответственно. Максимальные скорости накопления углерода характерны для ряда мелководных, изолированных от водохранилища озер с интенсивным развитием макрофитов – до 89 г С/м<sup>2</sup> · год. Запасы углерода в донных отложениях, приходящиеся на единицу площади дна, имеют тенденцию к росту с увеличением глубины: 22 т С/га – < 1 м, 28 т С/га – от 1 до 2 м, 44 т С/га – > 2 м, что соответствует 79–161 т/га в СО<sub>2</sub>-эквиваленте. Основная часть терригенного и аутигенного углерода, осаждающегося в донных отложениях в течение годового цикла седиментации, с потоками газов (углекислый газ, метан) со дна озер возвращается в природные биогеохимические циклы.

Ключевые слова: осадконакопление; органический углерод; депонирование; озера – отчлененные заливы; Куйбышевское водохранилище

Для цитирования: Зиганшин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р., Валиев В. С., Александрова А. Б. Осадконакопление и аккумуляция органического углерода в донных отложениях озер – отчлененных заливов Куйбышевского водохранилища // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 70–81. doi: 10.17076/lim2207

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан (Соглашение от 16.12.2024 № 98/2024 – ПД), предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

**I. I. Ziganshin\*, D. V. Ivanov, R. R. Khasanov, V. S. Valiev, A. B. Alexandrova. SEDIMENTATION AND ORGANIC CARBON ACCUMULATION IN SEDIMENTS OF LAKES FORMED IN DETACHED BAYS OF THE KUIBYSHEV STORAGE RESERVOIR**

*Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences (28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia), \*Irek.Ziganshin@tatar.ru*

In the context of global climate change driven by growing greenhouse gas concentrations in the atmosphere, the study of carbon deposition processes in natural environments is particularly relevant. The bottom sediments of water bodies, which act as long-term reservoirs of organic matter, play a significant role in the global carbon cycle. This article presents the results of a study on sedimentation and carbon accumulation processes in the sediments of 12 lakes. These lakes were formed by the separation of bays from the Kuibyshev Reservoir, located within the Saralinsky section of the Volga-Kama State Nature Biosphere Reserve and its buffer zone (Middle Volga, Republic of Tatarstan). The study identified the spatial distribution patterns of the sediments that have accumulated in these lakes since impoundment, as well as their thickness, which ranges from 5 to 48 cm. The sedimentation rate in the studied reservoirs was found to depend on their bed bathymetry, increasing from 0.8–3.0 mm/yr in areas shallower than 1 m to 3.9–7.2 mm/yr at depths exceeding 2 m. This corresponds to an annual mass accumulation rate of 680–3186 g/m<sup>2</sup>. The organic matter content in the sediments, which are predominantly composed of sandy silt and silty sand, is relatively low, ranging from 0.2 to 12.1 %. A clear relationship was observed between water depth and the organic carbon accumulation rate, which averaged 29, 53, and 66 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> for depths of <1 m, 1–2 m, and >2 m, respectively. The highest carbon accumulation rates are typical for the deep-water zones of most lakes, as well as for some shallow detached lakes that have intensive macrophyte growth, reaching up to 89 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>. Carbon stocks in the sediments per unit area of the lake bed also increase with depth: from 22 t C ha<sup>-1</sup> in the shallow zone and 28 t C ha<sup>-1</sup> at depths of 1 to 2 meters to 44 t C ha<sup>-1</sup> in the deep-water zone. This corresponds to 79–161 t ha<sup>-1</sup> in CO<sub>2</sub> equivalent. Most of the terrigenous and authigenic carbon deposited in the sediments during the annual cycle returns to the biogeochemical cycle via ascending flows of gases (carbon dioxide and methane) from the lake bottom.

**Keywords:** sedimentation; organic carbon; carbon deposition; lakes in detached bays; Kuibyshev storage reservoir

For citation: Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R., Valiev V. S., Alexandrova A. B. Sedimentation and organic carbon accumulation in sediments of lakes formed in detached bays of the Kuibyshev storage reservoir. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 70–81. doi: 10.17076/lim2207

**Funding.** The work was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, awarded to young Cand. Sci. degree holders (postdoctoral researchers) for preparing Dr. Sci. dissertation, conducting scientific research, and fulfilling duties at scientific and educational institutions of the Republic of Tatarstan under the State Program of the Republic of Tatarstan «Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan» (Agreement No. 98/2024–PD).

## Введение

Климатические изменения представляют собой один из наиболее масштабных и сложных вызовов современности. Важнейшей причиной наблюдаемых изменений являются выбросы парниковых газов, прежде всего углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), концентрация которого в атмосфере в два раза превышает доиндустриальный уровень [Friedlingstein et al., 2014]. Рост концентрации  $\text{CO}_2$  приводит к увеличению средней температуры на планете, сопровождающемуся усиленным таянием ледников и многолетней мерзлоты, повышением уровня Мирового океана и учащением экстремальных погодных явлений. В этих условиях исследования процессов накопления углерода, определяющих баланс между его поглощением природными средами и возвратом в атмосферу в виде парниковых газов, приобретают особую актуальность.

Значительную роль в снижении уровня углерода в атмосфере играют процессы его извлечения из атмосферного воздуха и последующего депонирования в компонентах природной среды, таких как почвенный покров, растительность, торф. Важную роль в глобальном углеродном цикле играют донные отложения водоемов, выполняющие функцию долговременного хранилища органического вещества [Мартынова, 2006; Cole et al., 2007; Tranvik et al., 2009; Sobek et al., 2009; Mendonça et al., 2017; Casas-Ruiz et al., 2023]. При этом потенциал донных отложений озер европейской части России остается недостаточно изученным [Белкина, 2011, 2017, 2019; Иванов и др., 2021; Сигарева и др., 2022; Потахин и др., 2025].

Строительство волжских водохранилищ привело к масштабным изменениям природных ландшафтов. В результате подъема их уровня до проектной отметки под водой оказались значительные площади речных пойм и надпойменных террас, в том числе различные отрицательные формы рельефа – овраги, балки, ложбины, а также озера и болота. Одним из последствий этого процесса стало формирование на водохранилищах сложной береговой линии с большим количеством заливов, многие из которых со временем подверглись естественной или искусственной изоляции от основной акватории вследствие накопления наносов, постепенного зарастания водной растительностью и изменений гидрологического режима. В результате возник совершенно новый тип озер – отчлененные заливы, сочетающие в себе черты как искусственных, так и естественных водных объектов.

На территории Республики Татарстан их образование в основном связано с абразионными-

аккумулятивными процессами, происходящими в прибрежной зоне Куйбышевского водохранилища. При отметках, приближенных к нормальному подпорному уровню 53 м Балтийской системы, в водохранилище насчитывается около 1400 водоемов соответствующего генезиса с суммарной площадью акватории 5632 га. Имеющиеся о них сведения ограничены морфометрическими характеристиками [Зиганшин и др., 2021а, 2024; Ziganshin et al., 2025]. Роль озер в аккумуляции и эмиссии органического углерода ранее не изучалась, исследования содержания и запасов органического углерода в донных отложениях водных объектов республики в целом весьма ограничены [Ziganshin et al., 2024].

Целью настоящей работы является изучение параметров осадконакопления и аккумуляции органического углерода в донных отложениях озер – отчлененных заливов, расположенных в границах Казанского района переменного подпора и Волжско-Камского плеса Куйбышевского водохранилища.

## Материалы и методы

Объектами исследования являлись 12 озер, расположенных на территории Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника и его охранной зоны, происхождение которых связано с затоплением водами Куйбышевского водохранилища в 1955–1957 гг. отрицательных форм рельефа II надпойменной террасы Волги (Байкуль, Волжское, Карташихинское, Круглое, Старое, Сайкуль, Чебаркуль) и Камы (Атабаевское, Ближнее, Большое, Дальнее, Лиса) с последующей изоляцией образовавшихся заливов от основной акватории абразионно-аккумулятивными пересыпями или искусственным путем (рис. 1). Озера Волжское, Ближнее, Большое, Лиса и Старое в период половодья имеют гидрологическую связь с водохранилищем. Озера Байкуль, Карташихинское, Круглое, Сайкуль, Чебаркуль, Атабаевское и Дальнее в настоящее время представляют собой полностью изолированные водные объекты.

Для установления морфометрических характеристик озер использовались спутниковые снимки Sentinel-2 сервиса Google Earth Pro и данные батиметрических измерений, выполненные в период летней межени 2024 г. Батиметрическая съемка озер проводилась при помощи эхолота «Garmin EchoMap UHD 92sv» с трансдюсером GT56 с ультравысокой детализацией с установленным программным обеспечением «Garmin QuickDraw Contours». Полученные дан-

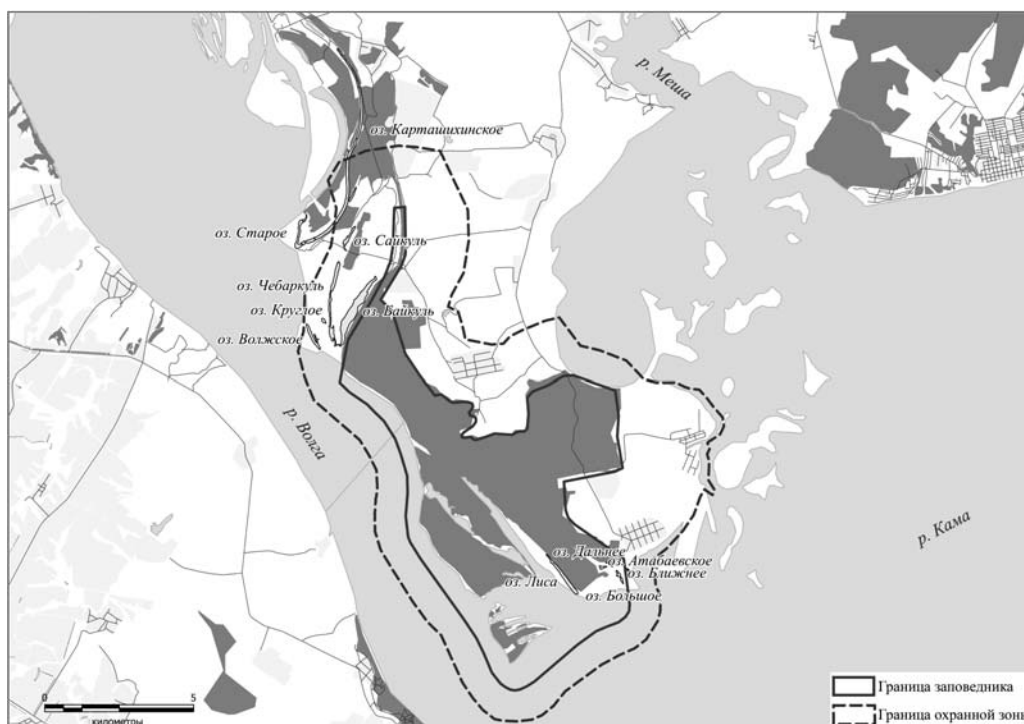


Рис. 1. Карта-схема расположения озер

Fig. 1. Location of the lakes

ные экспортировались в среду программного обеспечения ReefMaster 2.0 для создания карт подводного рельефа и анализа эхолокационных данных. Сгенерированные карты изобат с шагом 1 м были экспортированы в виде полигонов в формате shape для дальнейшего анализа морфометрических показателей в среде программного пакета Mapinfo Pro 16.

Грунтовая съемка выполнена с использованием трубки ГОИН «ТГ-1» и торфяного бура Гиллера «ТБГ-1». Исходя из особенностей рельефа дна, в каждом озере отобрано от 8 до 22 кернов донных отложений мощностью от 5 до 48 см. После морфологического описания керны разделяли на слои мощностью 5 см для физико-химического анализа.

Для оценки вклада терригенной составляющей в формирование вещественного состава отложений выполнен отбор смешанных образцов гумусовых горизонтов почв водосборной территории.

Аналитические исследования почв (21 образец) и донных отложений (93 образца) включали определение объемного веса (ГОСТ 5180–2015), гранулометрического состава (ГОСТ Р 12536–2014) и органического вещества (ОВ) (ГОСТ 26213–2021).

Для вычисления доли  $C_{орг}$  в общей массе ОВ использовали коэффициент 0,58 [Аринушкина, 1970].

Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета Statistica 8.0.

## Результаты и обсуждение

По площади акватории озера Саралинского участка Волжско-Камского заповедника относятся к классу озерков и маленьких озер с максимальной глубиной от 1 до 2,7 м [Зиганшин и др., 20216]. Озера волжской группы по сравнению с камскими имеют большие размеры и глубины. При этом в группе камских озер глубины менее 1 м занимают от 60 до 100 % площади акватории (табл. 1). По этой причине для них характерна более высокая степень зарастания [Хасанов и др., 2025]. Волжские озера отличаются удлиненной формой котловины, наследуют черты затопленных при создании водохранилища оврагов и балок (рис. 2). Озера камской группы, кроме вытянутого оз. Лиса, по форме котловины более близки к овальной форме (рис. 3).

Изученные озера – молодые лимнические объекты, толщина накопленных в их ложе за 70-летний период донных отложений колеблется от 5 до 48 см, в среднем составляя 21 см. Отложения достигают максимальной мощности в понижениях исходного рельефа, расположенных, как правило, в центральных частях котловин, минимальная толщина слоя осадка приурочена к полосе прибрежных мелководий (рис. 2 и 3).

Таблица 1. Морфометрические характеристики озер

Table 1. Morphometric characteristics of the lakes

| Озеро<br>Lake                                                     | Площадь,<br>га<br>Area,<br>ha | Объем,<br>тыс. м³<br>Volume,<br>thous. m³ | Длина, м<br>Length, m | Ширина, м<br>Width, m |              | Глубина, м<br>Depth, m |              | Доля мелководий<br><1 м, %<br>Proportion of shallows<br><1 m, % |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------|
|                                                                   |                               |                                           |                       | сред.<br>aver.        | макс.<br>max | сред.<br>aver.         | макс.<br>max |                                                                 |
| II надпойменная терраса р. Волги<br>II terrace of the Volga River |                               |                                           |                       |                       |              |                        |              |                                                                 |
| Байкуль<br>Baikul                                                 | 52,17                         | 747,5                                     | 2707                  | 193                   | 306          | 1,4                    | 2,7          | 23,6                                                            |
| Волжское<br>Volzhskoye                                            | 8,72                          | 105,2                                     | 993                   | 88                    | 101          | 1,2                    | 2,3          | 38,0                                                            |
| Карташихинское<br>Kartashikhinskoye                               | 58,18                         | 465,4                                     | 7476                  | 78                    | 172          | 0,8                    | 2,7          | 55,1                                                            |
| Круглое<br>Krugloye                                               | 1,50                          | 12,2                                      | 218                   | 70                    | 106          | 0,8                    | 1,3          | 50,1                                                            |
| Сайкуль<br>Saykul                                                 | 5,89                          | 33,2                                      | 923                   | 64                    | 127          | 0,6                    | 1,0          | 98,7                                                            |
| Старое<br>Staroye                                                 | 10,59                         | 158,9                                     | 1561                  | 68                    | 161          | 1,5                    | 2,9          | 25,0                                                            |
| Чебаркуль<br>Chebarkul                                            | 22,85                         | 257,6                                     | 2962                  | 77                    | 150          | 1,1                    | 2,7          | 24,8                                                            |
| II надпойменная терраса р. Камы<br>II terrace of the Kama River   |                               |                                           |                       |                       |              |                        |              |                                                                 |
| Атабаевское<br>Atabaevskoe                                        | 1,04                          | 9,3                                       | 275                   | 38                    | 72           | 0,9                    | 1,4          | 64,3                                                            |
| Ближнее<br>Blizhneye                                              | 0,48                          | 3,4                                       | 151                   | 28                    | 58           | 0,8                    | 1,2          | 99,4                                                            |
| Большое<br>Bolshoye                                               | 2,94                          | 32,4                                      | 506                   | 58                    | 141          | 1,1                    | 1,7          | 78,6                                                            |
| Дальнее<br>Dalneye                                                | 1,67                          | 13,1                                      | 269                   | 54                    | 91           | 0,9                    | 1,3          | 89,5                                                            |
| Лиса<br>Lisa                                                      | 14,88                         | 34,1                                      | 1713                  | 87                    | 121          | 0,5                    | 1,3          | 81,9                                                            |

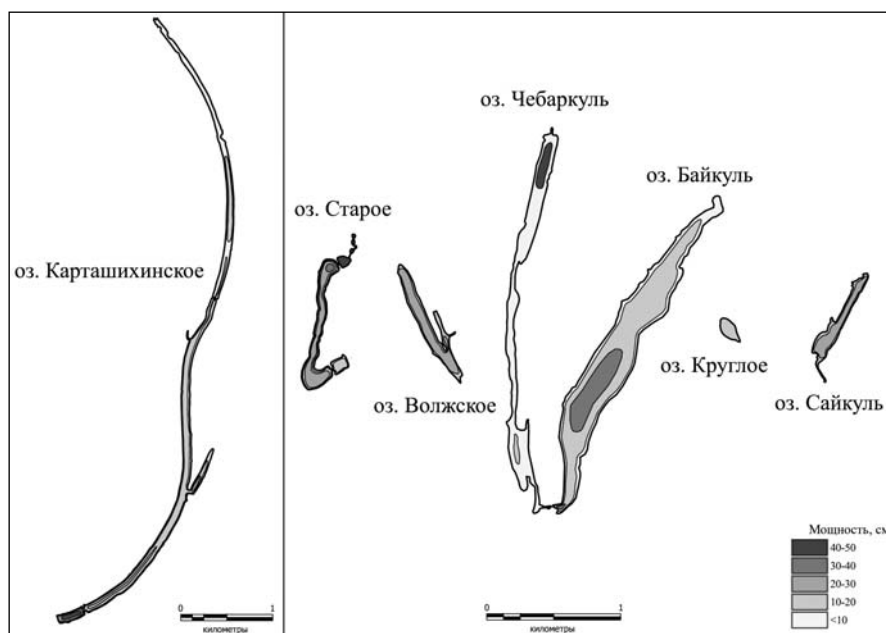


Рис. 2. Карта-схема мощности донных отложений озер, расположенных на II надпойменной террасе р. Волги

Fig. 2. Schematic map of the sediments thickness of the lakes located on the II terrace of the Volga River

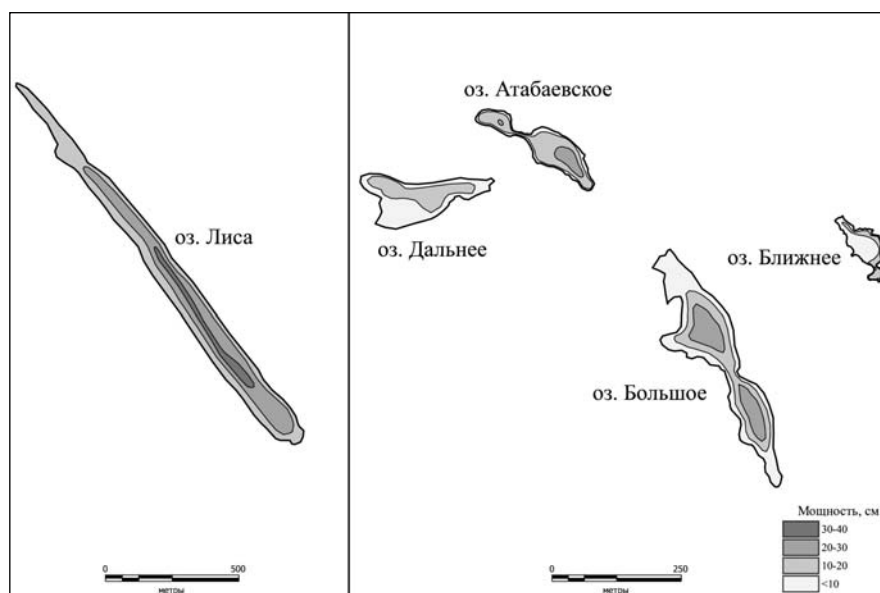


Рис. 3. Карта-схема мощности донных отложений озер, расположенных на II надпойменной террасе р. Камы

Fig. 3. Schematic map of the sediments thickness of the lakes located on the II terrace of the Kama River

Наиболее активно заиливаются озера, сохранившие периодическую (сезонную) гидрологическую связь с водохранилищем (Большое, Лиса, Старое), последнее служит одним из источников пополнения их котловин терригенным материалом.

Наличие в нижней части кернов маркерных слоев, представленных гумусовыми горизонтами почв, погребенных сначала водохранилищными, а затем собственно озерными отложениями, позволило рассчитать скорости и объемы накопления осадочного материала за период существования озер.

С учетом зависимости характера осадконакопления от глубины водоема в акватории озер было выделено три интервала (зоны) глубин: <1 м, 1–2 м и >2 м, в пределах которых выполнены расчеты интенсивности аккумуляции осадочного материала (табл. 2), включая органический углерод.

Высота слоя ежегодно аккумулируемых осадков в исследуемых водоемах лежит в диапазоне, характерном для озер и водохранилищ бассейна Средней Волги – 3–7 мм/год [Законнов и др., 2010; Иванов и др., 2011, 2018]. Она имеет тенденцию к увеличению с глубиной: 0,8–3,0 мм/год – на глубинах менее 1 м, 2,2–5,9 мм/год – в интервале глубин 1–2 м, 3,9–7,2 мм/год – более 2 м.

Скорости осадконакопления в озерах заповедника в зависимости от характерных для

них глубин варьируют в достаточно широких пределах – от 680 до 3186 г/м<sup>2</sup> в год (табл. 2). Средняя скорость накопления осадочного материала в озерах равна 1748 г/м<sup>2</sup> в год при медианном значении 1500 г/м<sup>2</sup> в год.

В озерах формируются различные типы минеральных осадков с содержанием ОВ от 0,2 до 12,1 %. Преобладание в структуре отложений песчаных илов обусловлено преимущественным поступлением и накоплением в ложе озер терригенных продуктов размыва четвертичных древнеаллювиальных отложений и почв водосборов, сложенных в основном песками, супесями и легкими суглинками (табл. 3). Вклад терригенного ОВ в формирование пула органического углерода донных отложений, по видимому, не менее существенен, поскольку средние величины его накопления в обеих средах практически одинаковы – около 4 %.

Анализ данных, характеризующих показатели накопления органического углерода в донных отложениях озер, показал возрастание скорости аккумуляции  $C_{орг}$  по мере увеличения глубины водоема (табл. 4), что обусловлено постепенным понижением интенсивности процессов минерализации поступающего на дно ОВ в условиях преобладания анаэробных процессов над аэробными, низкого окислительно-восстановительного потенциала донных отложений, слабого перемешивания столба воды в сравнении с мелководной зоной.

Таблица 2. Скорость осадконакопления (R) в озерах  
Table 2. Sediment accumulation rate (R) in the lakes

| Озеро<br>Lakes /<br>Глубина<br>Depth | <1 м<br><1 m    |              |                           |                               | 1–2 м<br>1–2 m |              |                           |                               | >2 м<br>>2 m   |              |                           |                               |
|--------------------------------------|-----------------|--------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|--------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|--------------|---------------------------|-------------------------------|
|                                      | S*, га<br>S, ha | H, м<br>H, m | R                         |                               | S, га<br>S, ha | H, м<br>H, m | R                         |                               | S, га<br>S, ha | H, м<br>H, m | R                         |                               |
|                                      |                 |              | мм/<br>год<br>mm/<br>year | г/(м² · год)<br>g/(m² · year) |                |              | мм/<br>год<br>mm/<br>year | г/(м² · год)<br>g/(m² · year) |                |              | мм/<br>год<br>mm/<br>year | г/(м² · год)<br>g/(m² · year) |
| Байкуль<br>Baikul                    | 12,3            | 0,06         | 0,9                       | 1080                          | 31,1           | 0,16         | 2,4                       | 1032                          | 8,8            | 0,27         | 4,0                       | 3040                          |
| Волжское<br>Volzhskoye               | 3,3             | 0,15         | 1,5                       | 1230                          | 4,3            | 0,18         | 2,7                       | 2295                          | 1,2            | 0,26         | 3,9                       | 1560                          |
| Карташихинское<br>Kartashikhinskoye  | 53,4            | 0,15         | 2,2                       | 2530                          | 3,8            | 0,20         | 2,9                       | 2407                          | 0,9            | 0,30         | 4,5                       | 2025                          |
| Круглое<br>Krugloye                  | 0,8             | 0,10         | 1,5                       | 870                           | 0,8            | 0,15         | 2,2                       | 1210                          | –              | –            | –                         | –                             |
| Сайкуль<br>Saykul                    | 5,9             | 0,30         | 4,5                       | 2115                          | –              | –            | –                         | –                             | –              | –            | –                         | –                             |
| Старое<br>Staroye                    | 4,8             | 0,05         | 0,8                       | 680                           | 50,0           | 0,27         | 4,0                       | 2920                          | 0,8            | 0,48         | 7,2                       | 3096                          |
| Чебаркуль<br>Chebarkul               | 20,3            | 0,05         | 0,8                       | 1328                          | 0,7            | 0,20         | 3,0                       | 1380                          | 1,9            | 0,36         | 5,4                       | 3186                          |
| Атабаевское<br>Atabaevskoye          | 0,9             | 0,16         | 2,4                       | 816                           | 0,2            | 0,27         | 4,0                       | 1440                          | –              | –            | –                         | –                             |
| Ближнее<br>Blizhneye                 | 0,3             | 0,15         | 2,2                       | 1606                          | 0,1            | 0,25         | 3,7                       | 1221                          | –              | –            | –                         | –                             |
| Большое<br>Bolshoye                  | 1,4             | 0,15         | 2,2                       | 946                           | 1,5            | 0,30         | 4,5                       | 1935                          | –              | –            | –                         | –                             |
| Дальнее<br>Dalneye                   | 1,1             | 0,15         | 2,2                       | 946                           | 0,6            | 0,25         | 3,7                       | 1332                          | –              | –            | –                         | –                             |
| Лиса<br>Lisa                         | 7,7             | 0,18         | 3,0                       | 2190                          | 7,2            | 0,40         | 5,9                       | 2537                          | –              | –            | –                         | –                             |

Примечание. S – занимаемая площадь; H – средняя толщина отложений; прочерк означает отсутствие в озере соответствующих глубин.  
Note. S – occupied area; H – average thickness of sediments; dash – absence of the corresponding depths in the lake.

Таблица 3. Гранулометрический состав, плотность (ρ) и содержание ОВ в донных отложениях озер и почвах водосборных территорий  
Table 3. Granulometric composition, density (ρ) and organic matter content in the lake sediments and soils of catchment areas

|                                     |       | Гранулометрический состав, %<br>Particle size, % |                          |                         |                        |                         |                         |                          | ρ, г/см³<br>ρ, g/cm³   | ОВ, %<br>OM, %         |
|-------------------------------------|-------|--------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
|                                     |       | 1–0,25<br>mm                                     | 0,25–0,05<br>mm          | 0,05–0,01<br>mm         | 0,01–0,005<br>mm       | 0,005–0,001<br>mm       | <0,001<br>mm            | <0,01<br>mm              |                        |                        |
| Донные<br>отложения<br>Sediments    | <1 м  | <u>1,6</u><br>0,2–5,6                            | <u>56,2</u><br>12,6–88,2 | <u>24,3</u><br>0,7–50,8 | <u>4,4</u><br>0,2–12,2 | <u>6,6</u><br>4,0–11,8  | <u>7,5</u><br>0,5–16,1  | <u>18,5</u><br>5,6–35,1  | <u>0,94</u><br>0,3–1,7 | <u>2,7</u><br>0,2–6,6  |
|                                     | 1–2 м | <u>1,1</u><br>0,9–1,2                            | <u>34,5</u><br>13,9–90,8 | <u>32,1</u><br>3,0–59,4 | <u>7,9</u><br>0,2–15,1 | <u>14,2</u><br>4,8–19,2 | <u>11,1</u><br>0,1–21,7 | <u>32,2</u><br>5,0–47,8  | <u>0,53</u><br>0,3–1,2 | <u>5,9</u><br>0,5–12,1 |
|                                     | >2 м  | <u>0,3</u><br>0,1–0,5                            | <u>36,3</u><br>0,7–73,7  | <u>32,9</u><br>12,6–52  | <u>5,5</u><br>0,7–12,5 | <u>13,8</u><br>4,9–24,7 | <u>11,5</u><br>4,1–27,3 | <u>30,7</u><br>12,9–64,5 | <u>0,54</u><br>0,3–1,1 | <u>4,2</u><br>1,7–5,7  |
| Почвы водосборов<br>Catchment soils |       | <u>3,6</u><br>0,5–13,8                           | <u>48,0</u><br>4,2–74,3  | <u>25,1</u><br>3,6–49,0 | <u>5,6</u><br>1,2–9,6  | <u>8,7</u><br>3,6–13,7  | <u>9,0</u><br>1,3–24,5  | <u>23,3</u><br>6,3–46,2  | <u>1,11</u><br>1,0–1,3 | <u>4,0</u><br>1,5–6,5  |

Примечание. В числителе – среднее, в знаменателе – пределы варьирования.  
Note. The numerator – mean value, the denominator – the range; OM – organic matter.

Таблица 4. Скорость накопления органического углерода в донных отложениях озер по глубинам  
Table 4. The rate of organic carbon accumulation in the bottom sediments of the lakes by depth

| Озеро<br>Lakes                    | г С/м <sup>2</sup> · год<br>g C/(m <sup>2</sup> · year) |       |      | г СО <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> · год<br>g CO <sub>2</sub> /(m <sup>2</sup> · year) |       |      |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|
|                                   | <1 m                                                    | 1–2 m | >2 m | <1 m                                                                                  | 1–2 m | >2 m |
| Байкуль<br>Baikul                 | 4                                                       | 34    | 55   | 15                                                                                    | 125   | 202  |
| Волжское<br>Volzhskoye            | 38                                                      | 37    | 52   | 139                                                                                   | 136   | 191  |
| Карташинское<br>Kartashikhinskoye | 2                                                       | 46    | 55   | 7                                                                                     | 169   | 202  |
| Круглое<br>Krugloye               | 27                                                      | 33    | –    | 99                                                                                    | 121   | –    |
| Сайкуль<br>Saykul                 | 89                                                      | –     | –    | 326                                                                                   | –     | –    |
| Старое<br>Staroye                 | 14                                                      | 64    | 80   | 51                                                                                    | 235   | 293  |
| Чебаркуль<br>Chebarkul            | 8                                                       | 52    | 86   | 29                                                                                    | 191   | 315  |
| Атабаевское<br>Atabaevskoye       | 29                                                      | 82    | –    | 106                                                                                   | 301   | –    |
| Ближнее<br>Blizhneye              | 40                                                      | 54    | –    | 147                                                                                   | 198   | –    |
| Большое<br>Bolshoye               | 27                                                      | 50    | –    | 99                                                                                    | 183   | –    |
| Дальнее<br>Dalneye                | 27                                                      | 64    | –    | 99                                                                                    | 235   | –    |
| Лиса<br>Lisa                      | 55                                                      | 63    | –    | 202                                                                                   | 231   | –    |
| В среднем<br>On average           | 29                                                      | 53    | 66   | 106                                                                                   | 194   | 242  |

Примечание. Прочерк означает отсутствие в озере соответствующих глубин.

Note. Dash – absence of the corresponding depths in the lake.

В мелководных, хорошо прогреваемых и сильно заросших изолированных от водохранилища отчлененных заливах (Сайкуль, Атабаевское) скорость накопления углерода также может достигать больших значений (>80 г С/м<sup>2</sup> · год). Зеленый пояс макрофитов в них не только эффективно задерживает поступающее с водосбора органическое вещество, но и сам при отмирании является основным поставщиком углерода в донные отложения.

Мелководья наиболее крупных озер заповедника выделяются крайне низкими значениями скорости накопления органического углерода. В таких больших по площади озерах, как Карташинское, Чебаркуль и Байкуль, скорость накопления углерода в литорали не превышает 2–8 г С/м<sup>2</sup> · год. Вследствие особенностей рельефа дна органический материал выносится из слабозаросших мелководных зон в более глубокие участки озер, где аккумуляция С<sub>орг</sub> достигает уже 34–86 г С/м<sup>2</sup> · год.

В пересчете на углекислый газ скорость аккумуляции ОВ в донных отложениях отчлененных заливов составляет в среднем

193 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> · год (табл. 4). Это примерно в 2,5 раза ниже, чем измеренные показатели эмиссии СО<sub>2</sub> с поверхности Куйбышевского водохранилища в акватории Саралинского участка заповедника – 487 г СО<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> · год [Никитин и др., 2025]. Таким образом, можно полагать, что в углеродном балансе исследуемых водоемов эмиссия углерода из донных отложений, которая осуществляется в форме углекислого газа и метана, преобладает над его депонированием. Как было показано на примере водоемов Чувашской Республики [Иванов и др., 2021], до 2/3 углерода, оседающего в донных отложениях, подвергается деструкции и минерализации.

Сравнительные оценки показывают, что соотношение между поступлением и эмиссией углерода в водоемах Саралинского участка Волжско-Камского заповедника и в озерах Чувашской Республики практически одинаково. Это дает основания полагать, что около 70 % органического углерода, аккумулирующегося в донных отложениях водоемов бассейна Средней Волги, подвергается минерализации и в виде газообразных СО<sub>2</sub> и СН<sub>4</sub> вновь

возвращается в природный биогеохимический круговорот.

В исследованных водоемах заповедника запасы углерода в донных отложениях, приходящиеся на единицу площади их ложа, имеют тенденцию к росту с увеличением глубины: 22 т С/га – на глубине <1 м, 28 т С/га – на глубинах от 1 до 2 м, 44 т С/га – >2 м, что в среднем составляет 31 т/га. Суммарные запасы  $C_{орг}$  в донных отложениях всех 12 озер превышают 3 тыс. т, что в  $CO_2$ -эквиваленте достигает 12 тыс. т (табл. 5).

**Заключение**

Впервые для нового типа озер, образовавшихся в результате отчленения от основной акватории заливов Куйбышевского водохранилища (Средняя Волга, Республика Татарстан), получены количественные оценки скоростей формирования донных отложений и аккумуляции органического углерода, установлен ряд закономерностей в проявлении указанных процессов, показана роль глубины и степени

изолированности водоема в формировании пула органического углерода в донных отложениях.

В структуре донных отложений озер, расположенных на территории Саралинского участка Волжско-Камского заповедника и его охранный зоны, доминирующее положение занимают песчанистые илы с содержанием ОВ до 12,1 %, что определяется значительным вкладом в их формирование терригенного материала соответствующего гранулометрического состава (пески, супеси, легкие суглинки) и почвенного гумуса. Толщина накопленного за период существования озер слоя донных отложений варьирует от 5 до 48 см, демонстрируя характерную пространственную дифференциацию: максимальные ее значения приурочены к центральным, относительно глубоким (до 3 м) участкам котловин, а минимальные – к прибрежным (до 1 м).

Скорости осадконакопления в отчлененных заливах лежат в диапазоне значений, характеризующих интенсивность аккумуляции осадков в разнотипных водоемах Средней Волги: 680–3186 г/м<sup>2</sup> · год или 0,8–7,2 мм/год.

Таблица 5. Запасы органического углерода в донных отложениях озер  
Table 5. Stocks of organic carbon in the bottom sediments of the lakes

| Озеро<br>Lakes                      | Масса<br>отложений, т<br>Mass<br>of sediment, t | Запасы<br>Stocks |                                        |                  |       |      |                                                |       |      |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------|------------------|-------|------|------------------------------------------------|-------|------|
|                                     |                                                 | τ C<br>t C       | τ CO <sub>2</sub><br>t CO <sub>2</sub> | τ C/га<br>t C/ha |       |      | τ CO <sub>2</sub> /га<br>t CO <sub>2</sub> /ha |       |      |
|                                     |                                                 |                  |                                        | <1 м             | 1–2 м | >2 м | <1 м                                           | 1–2 м | >2 м |
| Байкуль<br>Baikul                   | 48290                                           | 1061             | 3890                                   | 3                | 20    | 40   | 11                                             | 73    | 147  |
| Волжское<br>Volzhskoye              | 8301                                            | 349              | 1280                                   | 40               | 20    | 30   | 147                                            | 73    | 110  |
| Карташихинское<br>Kartashikhinskoye | 1055                                            | 31               | 114                                    | 2                | 30    | 40   | 7                                              | 110   | 147  |
| Круглое<br>Krugloye                 | 13996                                           | 304              | 1144                                   | 20               | 20    | –    | 73                                             | 73    | –    |
| Сайкуль<br>Saykul                   | 99749                                           | 247              | 905                                    | 60               | –     | –    | 220                                            | –     | –    |
| Старое<br>Staroye                   | 11785                                           | 270              | 990                                    | 9                | 40    | 50   | 33                                             | 147   | 183  |
| Чебаркуль<br>Chebarkul              | 21546                                           | 236              | 865                                    | 5                | 5     | 60   | 18                                             | 18    | 220  |
| Атабаевское<br>Atabaevskoe          | 632                                             | 26               | 95                                     | 20               | 20    | –    | 73                                             | 73    | –    |
| Ближнее<br>Blizhneye                | 2879                                            | 77               | 282                                    | 30               | 30    | –    | 110                                            | 110   | –    |
| Большое<br>Bolshoye                 | 1215                                            | 45               | 165                                    | 20               | 30    | –    | 73                                             | 110   | –    |
| Дальнее<br>Dalneye                  | 511                                             | 15               | 55                                     | 20               | 40    | –    | 73                                             | 147   | –    |
| Лиса<br>Lisa                        | 22420                                           | 585              | 2145                                   | 30               | 50    | –    | 110                                            | 183   | –    |

Отмечена взаимосвязь между глубиной водоема и скоростью аккумуляции органического углерода в составе донных отложений, которая в среднем составила 29, 53 и 66 г С/м<sup>2</sup> · год для глубин <1 м, 1–2 м и >2 м соответственно. При этом высокие показатели скорости накопления С<sub>орг</sub> также отмечены в мелководных озерах, отличающихся высокой степенью зарастания макрофитами, – до 89 г С/м<sup>2</sup> · год. В таких водоемах возрастает роль аутигенного ОВ в формировании общих его запасов в донных отложениях.

Согласно расчетам, запасы органического углерода в донных отложениях исследованных озер варьируют от 22 до 44 т/га и суммарно превышают 3 тыс. т С, или 12 тыс. т в СО<sub>2</sub>-эквиваленте. Предварительные оценки показывают, что из общего количества углерода, осаждающегося в донных отложениях озер в процессе седиментации, не менее 70 % возвращается в биогеохимические циклы с восходящими со дна потоками углекислого газа и метана в результате деструкции и минерализации ОВ.

## Литература

- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.
- Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 35–41.
- Белкина Н. А. Количественный и качественный состав органического вещества и его трансформация в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 64–72. doi: 10.17076/lim467
- Белкина Н. А. Особенности процесса трансформации органического вещества в донных отложениях озер Карелии и его влияние на химический состав придонных вод // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. № 4. С. 263–276.
- ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
- ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
- ГОСТ 26213–2021. Почвы. Методы определения органического вещества.
- Законнов В. В., Поддубный С. А., Законнова А. В., Касьянова В. В. Осадкообразование в зонах переменного подпора водохранилищ Волжского каскада // Водные ресурсы. 2010. № 4. С. 425–433.
- Зиганшин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р., Кочетков Д. А. Генезис и морфометрические характеристики отчлененных заливов Казанского района переменного подпора Куйбышевского водохранилища // Российский журнал прикладной экологии. 2024. № 4. С. 10–17. doi: 10.24852/2411-7374.2024.4.10.17
- Зиганшин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р. Генезис и морфометрическая характеристика озер охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021а. № 1. С. 36–43. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10039
- Зиганшин И. И., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р. Осадконакопление в озерах охранной зоны Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. 2021б. № 2. С. 47–52. doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.47.52
- Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В. Оценка скорости осадконакопления в озерах Казани и Приказанья // Георесурсы. 2011. № 2. С. 46–48.
- Иванов Д. В., Осмелкин Е. В., Зиганшин И. И. Исследование современного и исторического осадконакопления в водоемах Приволжской возвышенности и низменного Заволжья // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 31–43. doi: 10.17076/lim844
- Иванов Д. В., Осмелкин Е. В., Зиганшин И. И. Пространственные закономерности накопления углерода, азота и фосфора в донных отложениях озер Чувашской республики // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 4. С. 108–118. doi: 10.17076/lim1402
- Мартынова М. В. Продукционно-деструктивные процессы в воде и аккумуляция веществ на дне озер и водохранилищ // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 6. С. 721–727.
- Никитин О. В., Степанова Н. Ю., Кузьмин Р. С., Латыпова В. З. Оценка эмиссии парниковых газов от Куйбышевского водохранилища с использованием модели G-res // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Мат-лы III Международной конференции. Казань: АН РТ, 2025. С. 459–464.
- 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.
- Потехин 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 Чудская Ламба (заповедник «Кивач») // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 62–73. doi: 10.17076/lim2028
- Сigareва Л. Е., Тимофеева Н. А., Законнов В. В. Растительные пигменты и органическое вещество в донных отложениях крупных мелководных озер Северо-Запада России // Геохимия. 2022. Т. 67, № 12. С. 1285–1296. doi: 10.1134/s0016702922100081
- Хасанов Р. Р., Зиганшин И. И., Валиев В. С., Александрова А. Б. Показатели зарастания озер Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Биосфера. 2025. Т. 17, № 2. С. 75–82. doi: 10.24855/biosfera.v17i2.986
- Casas-Ruiz J. P., Bodmer P., Bona K. A., Butman D., Couturier M., Emilson E. J. S., Finlay K., Genet H., Hayes D., Karlsson J., Paré D., Peng C., Striegl R., Webb J., Wei X., Ziegler S., Giorgio P. Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange // Nat. Commun. 2023. Vol. 14. Art. 1571. doi: 10.1038/s41467-023-37232-2

Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget // *Ecosystems*. 2007. No. 10. P. 171–184. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

Friedlingstein P., Andrew R. M., Rogelj J., Peters G. P., Canadell J. G., Knutti R., Luderer G., Raupach M. R., Schaeffer M., van Vuuren D. P., Le Quér C. Persistent growth of CO<sub>2</sub> emissions and implications for reaching climate targets // *Nat. Geosci.* 2014. Vol. 7. P. 709–715. doi: 10.1038/ngeo2248

Mendonça R., Müller R. A., Clow D., Verpoorter Ch., Raymond P., Tranvik L. J., Sobek S. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs // *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. Art. 1694. doi: 10.1038/s41467-017-01789-6

Sobek S., Durisch-Kaiser E., Zurbügg R., Wongfun N., Wessels M., Pasche N., Wehrli B. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, iss. 6. P. 2243–2254. doi: 10.4319/lo.2009.54.6.2243

Tranvik L. J., Downing J., Cotner J., Loiselle S., Striegl R. G., Ballatore T. J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L. B., Kortelainen P., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D. M., McCallister S. L., McKnight D. M., Melack J. M., Overholt E., Porter J. A., Prairie Y., Renwick W. H., Roland F., Sherman B. S., Schindler D. W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M. J., Verschoor A. M., von Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G. A. Lakes and impoundments as regulators of carbon cycling and climate // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, iss. 6. P. 2298–2314.

Ziganshin I., Ivanov D., Mukhametzyanova L. Estimation of organic carbon stocks in bottom sediments of Middle Kaban Lake (Kazan, Republic of Tatarstan) // *E3S Web of Conferences*. 2024. No. 555. Art. 01017. doi: 10.1051/e3sconf/202455501017

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Safin I. M. Spatial distribution and hydrographic characteristics analysis in detached bays of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev reservoir // *Российский журнал прикладной экологии*. 2025. № 2. С. 66–70. doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.47.52

## References

Arinushkina E. V. Manual on chemical analysis of soils. Moscow: MSU; 1970. 487 p. (In Russ.)

Belkina N. A. Features of the transformation process of organic substances in sediments of lakes in Karelia and its impact on the chemical composition of water. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov = Geopolitics and Eco-geodynamics of Regions*. 2019;4:263–276. (In Russ.)

Belkina N. A. Quantitative and qualitative composition of organic matter and its transformation in a surface layer of Lake Onego sediments. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2017;10:64–72. (In Russ.). doi: 10.17076/lim467

Belkina N. A. Role of sediments in the processes of transformation of organic matter and nutrients in lake ecosystems. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2011;4:35–41. (In Russ.)

Casas-Ruiz J. P., Bodmer P., Bona K. A., Butman D., Couturier M., Emilson E. J. S., Finlay K., Gernet H., Hayes D., Karlsson J., Paré D., Peng C., Striegl R., Webb J., Wei X., Ziegler S., Giorgio P. Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange. *Nat. Commun.* 2023;14:1571. doi: 10.1038/s41467-023-37232-2

Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*. 2007;10: 171–184. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

Friedlingstein P., Andrew R. M., Rogelj J., Peters G. P., Canadell J. G., Knutti R., Luderer G., Raupach M. R., Schaeffer M., van Vuuren D. P., Le Quér C. Persistent growth of CO<sub>2</sub> emissions and implications for reaching climate targets. *Nat. Geosci.* 2014;7:709–715. doi: 10.1038/ngeo2248

GOST 5180–2015. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. (In Russ.)

GOST 26213–2021. Soils. Methods for determination of organic matter. (In Russ.)

GOST 12536–2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. (In Russ.)

Ivanov D. V., Osmelkin E. V., Ziganshin I. I. A study of contemporary and historical sedimentation in waterbodies of the Volga upland and the Low-lying Trans-Volga region. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2018;9:31–43. (In Russ.). doi: 10.17076/lim844

Ivanov D. V., Osmelkin E. V., Ziganshin I. I. Spatial regularities of carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in lake sediments of the Chuvash Republic. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2021;4: 108–118. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1402

Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Assessment of the sedimentation rate in lakes of Kazan and Prikazansky region. *Georesursy = Georesources*. 2011;2:46–48. (In Russ.)

Khasanov R. R., Ziganshin I. I., Valiev V. S., Alexandrova A. B. Parameters of lakes overgrowing in the Saralinsky section of the Volzsko-Kamsky Reserve. *Biosfera = Biosphere*. 2025;17(2):75–82. (In Russ.). doi: 10.24855/biosfera.v17i2.986

Martynova M. V. Production-destruction processes in water and the accumulation of matter on the beds of lakes and reservoirs. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(6):721–727. (In Russ.)

Mendonça R., Müller R. A., Clow D., Verpoorter Ch., Raymond P., Tranvik L. J., Sobek S. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nat. Commun.* 2017;8: 1694. doi: 10.1038/s41467-017-01789-6

Nikitin O. V., Stepanova N. Yu., Kuz'min R. S., Latypova V. Z. Assessment of greenhouse gas emissions from the Kuibyshev Reservoir using the G-res model. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mat-ly III Mezhdunarodnoi konferentsii = Lakes of Eurasia: problems and solutions. Proceed. III Int. conf.* Kazan: AN RT; 2025. P. 459–464. (In Russ.)

PND F 16.2.2:2.3:3.32-02. Quantitative chemical analysis of soils. 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.)

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;12:62–73. (In Russ.). doi: 10.17076/lim2028

Sigareva L. E., Timofeeva N. A., Zakonnov V. V. Plant pigments and organic matter in the bottom sediments of large shallow lakes in northwestern Russia. *Geokhimiya = Geochemistry International*. 2022;67(12):1285–1296. (In Russ.). doi: 10.1134/s0016702922100081

Sobek S., Durisch-Kaiser E., Zurbrugg R., Wongfun N., Wessels M., Pasche N., Wehrli B. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source. *Limnol. Oceanogr.* 2009;54(6):2243–2254. doi: 10.4319/lo.2009.54.6.2243

Tranvik L. J., Downing J., Cotner J., Loiselle S., Striegl R. G., Ballatore T. J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L. B., Kortelainen P., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D. M., McCallister S. L., McKnight D. M., Melack J. M., Overholt E., Porter J. A., Prairie Y., Renwick W. H., Roland F., Sherman B. S., Schindler D. W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M. J., Verschoor A. M., von Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G. A. Lakes and impoundments as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol. Oceanogr.* 2009;54(6):2298–2314.

Zakonnov V. V., Poddubnyi S. A., Zakonnova A. V., Kas'yanova V. V. Sedimentation in variable-backwater zones of the Volga chain reservoirs. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;4:425–433. (In Russ.)

Ziganshin I., Ivanov D., Mukhametzyanova L. Estimation of organic carbon stocks in bottom sediments of Middle Kaban Lake (Kazan, Republic of Tatarstan). *E3S Web of Conferences*. 2024;555:01017. doi: 10.1051/e3sconf/202455501017

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Safin I. M. Spatial distribution and hydrographic characteristics analysis in detached bays of the Tetyushsky reach of the Kuibyshev reservoir. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2025;2:66–70. doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.47.52

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R. Genesis and morphometric characteristics of lakes in the protected zone of the Saralinsky area of the Volzhsko-Kamsky Reserve. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2021;1:36–43. (In Russ.). doi: 10.24411/2411-7374-2020-10039

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R. Sedimentation in the lakes of the protected zone of the Saralinsky area of the Volzhsko-Kamsky reserve. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2021;2:47–52. (In Russ.). doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.47.52

Ziganshin I. I., Ivanov D. V., Khasanov R. R., Kochetkov D. A. Genesis and morphometric characteristics of separated bays of the Kazan region of the Kuibyshev Reservoir. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2024;4:10–17. (In Russ.). doi: 10.24852/2411-7374.2024.4.10.17

Поступила в редакцию / received: 02.09.2025; принята к публикации / accepted: 09.09.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Зиганшин Ирек Ильгизарович

канд. геогр. наук, доцент,  
старший научный сотрудник

e-mail: Irek.Ziganshin@tatar.ru

### Иванов Дмитрий Владимирович

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

e-mail: water-rf@mail.ru

### Хасанов Рустам Равилович

научный сотрудник

e-mail: rustamkhasanov88@gmail.com

### Валиев Всеволод Сергеевич

старший научный сотрудник

e-mail: podrost@mail.ru

### Александрова Асель Биляловна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: adabl@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Ziganshin, Irek

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

### Ivanov, Dmitry

Dr. Sci. (Geog.), Deputy Director

### Khasanov, Rustam

Researcher

### Valiev, Vsevolod

Senior Researcher

### Alexandrova, Asel

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

УДК 574.583

## СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗООПЛАНКТОНА КОНДОПОЖСКОГО ЗАЛИВА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

**М. Т. Сярки, Д. С. Коновалов\***

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),  
\*konovlov.daniil1998@gmail.com*

Проведен анализ сезонной динамики вертикального распределения зоопланктона в различных по глубине и трофическим условиям районах Кондопожского залива Онежского озера. Основой для анализа послужили данные сетных уловов зоопланктона за 1988–2021 гг. (130 станций, 386 проб). Траектории среднемноголетней сезонной динамики показателей получены сглаживанием методом скользящего среднего рядов данных, свернутых по показателю сезонности (сутки с начала года). Основное внимание уделено сезонным изменениям в распределении зоопланктона в столбе воды. В качестве одного из ведущих факторов вертикальной неоднородности среды рассматривается температурный режим, влияющий на сроки и масштаб стратификации вод. Вегетационный период по типу распределения зоопланктона разделяется на три этапа: весенний, летний и осенний. Общие закономерности динамики распределения зоопланктона сходны в пелагиали глубоководного района Онежского озера (глубина 75–100 м) и центральной части Кондопожского залива (глубина 75–80 м) и соответствуют изменениям вертикальной неоднородности столба воды. Из-за мелководности (до 17 м) и относительной закрытости от волнового перемешивания распределение зоопланктона вершинной части залива имеет особенности. В начале августа происходит перемешивание водной толщи и выравнивание вертикального распределения зоопланктона. Сравнение динамики обилия зоопланктона в районах, отличающихся по трофическим условиям, показало, что общие закономерности в поверхностном слое сходны, но в глубоких слоях существуют различия в сезонной траектории. В летний период биомасса зоопланктона в заливе в 2–3 раза превышала таковую в открытой части озера. Исследование сезонной динамики вертикального распределения зоопланктона в столбе воды позволит уточнить закономерности функционирования пелагического планктона в условиях различных по температурному режиму лет, что актуально при изменении климата.

**Ключевые слова:** планктонные животные; трофические условия; термический режим; стратификация вод; эпилимнион; гипolimнион; пространственно-временная неоднородность среды

Для цитирования: Сярки М. Т., Коновалов Д. С. Сезонная динамика вертикального распределения зоопланктона Кондопожского залива Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 82–96. doi: 10.17076/lim2023

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

# M. T. Syarki, D. S. Konovalov\*. SEASONAL DYNAMICS OF ZOOPLANKTON VERTICAL DISTRIBUTION IN KONDOPOGA BAY, LAKE ONEGO

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia),  
\*konovalov.daniil1998@gmail.com

The article analyzes seasonal patterns in the vertical distribution of zooplankton in areas of Kondopoga Bay of Lake Onego with different depths and trophic conditions. The analysis was based on data from net catches of zooplankton in 1988–2021 (130 stations, 386 samples). Average multiannual seasonal trajectories of the indicators were obtained by moving-average smoothing of the data series collapsed by seasonality (day since the beginning of the year). The main focus was on seasonal variations in the distribution of zooplankton in the water column. The temperature regime affecting the timing and scale of water stratification is considered as one of the leading factors of the vertical heterogeneity of the medium. The growing season is divided into three stages according to the type of zooplankton distribution: spring, summer and autumn. The general patterns of zooplankton distribution are similar in the open deepwater area of Lake Onego (depth 75–100 m) and the central part of Kondopoga Bay (depth 75–80 m), and correspond to changes in the vertical heterogeneity of the water column. Due to shallowness (up to 17 m) and relative proximity of wave mixing, the distribution of zooplankton in the bay head has some specific features. In early August, the water column is mixed and the vertical distribution of zooplankton is leveled out. A comparison of the dynamics of zooplankton abundance in areas with different trophic conditions showed that the general patterns in the surface layer are similar, but the seasonal trajectories in the deeper layers vary. In summer, zooplankton biomass in the bay was 2–3 times that of the lake's open part. The study of the seasonal variation of the vertical distribution of zooplankton in the water column will provide insights into the patterns of pelagic plankton functioning in years with different temperature conditions, which is relevant under climate change.

**Keywords:** planktic animals; trophic conditions; thermal regime; water stratification; epilimnion; hypolimnion; spatio-temporal heterogeneity of the environment

For citation: Syarki M. T., Konovalov D. S. Seasonal dynamics of zooplankton vertical distribution in Kondopoga Bay, Lake Onego. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 82–96. doi: 10.17076/lim2023

**Funding.** The work was carried out under state assignment to the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS.

## Введение

Вертикальная неоднородность среды является одной из главных концепций лимнологии, и без нее невозможно понимание многих гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов [Китаев, 2007; Wilson et al., 2020]. Сезонные явления в водной толще – термический бар и термоклин, прямая и обратная стратификация – оказывают влияние на жизнь планктонных организмов и развитие популяций. Если воздействие силы тяжести представляет собой постоянный вектор, то температура воды, ее плотность, содержание кислорода и прозрачность характеризуются цикличностью различных временных масштабов [Halliday et al., 2012; Баянов, Ананьев, 2015; Rajwa-Kuligiewicz et al., 2015]. Градиент факторов по вертикали в озерах выражен в масштабе

метров и десятков метров и значительно изменяется в сезонном аспекте.

Сроки изменения температуры, появления прямой и обратной стратификации, продолжительности ледостава и безледного периода, а также биологического лета (переход температуры воды через 10 °C) имеют определяющее значение для сезонных процессов развития планктонных организмов, популяций и сообществ [Wagner, Adrian, 2009; Сярки, 2015; Сярки, Фомина, 2019а; Фомина, 2022]. Известно, что климатические изменения влияют на экосистемы в основном за счет сдвигов сроков основных гидрологических явлений, из-за которых возможны фенологические несоответствия между процессами [Izmest'eva et al., 2016; Matsuzaki et al., 2020]. Жизненные циклы планктонных видов зоопланктона синхронизированы с сезонной цикличностью их условий, поэто-

му особую актуальность приобретает изучение сезонной динамики как процесса, фенологии сообществ, формализации среднемноголетних особенностей сезонных сукцессий и оценка их межгодовой изменчивости [Thackeray et al., 2006; Wagner, Adrian, 2009; Wilson et al., 2020].

Существующие методы описания годового цикла чаще всего представляют сезонную динамику как набор различных состояний сообщества: зимнее, весеннее, летнее и осеннее [Куликова и др., 1997; Кипрушина, 2009; Лазарева, Соколова, 2013; Фенева и др., 2016]. Реализуемый в настоящем исследовании подход представляет взгляд на сезонную динамику как на непрерывный циклический процесс, который складывается из закономерных и случайных аспектов [Калинкина и др., 2018]. Изучение основных закономерностей сезонных явлений основано на анализе среднемноголетних траекторий динамики зоопланктона, его количественных и структурных характеристик, выявлении синхронности воздействия абиотических и биотических факторов, оценки сезонной и межгодовой изменчивости показателей.

Ранее были проведены анализ и формализация сезонной динамики обилия пелагического зоопланктона в столбе воды [Сярки, 2015, 2024; Фомина, Сярки, 2018; Сярки, Фомина, 2019a]. Настоящая работа продолжает исследование сезонных аспектов распределения зоопланктона по глубине и является частью построения эмпирической модели среднемноголетней сезонной динамики животных сообществ пелагиали Онежского озера с учетом его вертикального распределения.

Цель настоящей работы – изучение сезонных особенностей вертикального распределения зоопланктона Кондопожского залива.

## Материалы и методы

### *Характеристика района исследования*

Онежское озеро – одно из Великих озер Европы, отличается крупными размерами и на большей части своей акватории сохранило естественное состояние планктонной экосистемы с олиготрофным статусом.

Пелагическая часть озера характеризуется инертностью своих гидротермических и гидрохимических свойств. Залив Большое Онего характеризуется большими глубинами (~100 м), свободным водообменом с центральным плесом Онежского озера, олиготрофным статусом, высоким качеством воды и низким ( $P_{\text{общ}} 7\text{--}10$  мкг/л) содержанием биогенных элементов [Крупнейшие..., 2015; Теканова и др., 2019].

Кондопожский залив – один из крупнейших ( $S = 225$  км<sup>2</sup>) и наиболее антропогенно измененных заливов Онежского озера. В его акватории выделяется вершинная часть (рис. 1, станция К3) с глубинами до 20 м и центральная (рис. 1, станция К6) с глубинами до 80 м [Онежское..., 2010]. Третий по величине приток Онежского озера, р. Суна, со среднегодовым расходом 2,3 км<sup>3</sup>/год [Балаганский и др., 2015] является основным источником поступления органического вещества и биогенных элементов в акваторию залива [Сабылина и др., 2010; Лозовик и др., 2016; Galakhina et al., 2022]. Среди антропогенных источников формирования химического состава воды залива выделяется расположенный в вершинной части залива Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат, сточные воды которого сбрасываются в вершинной части [Сабылина, 2015; Galakhina et al., 2022], их объем в 2019–2020 гг. в среднем составил около 47 млн м<sup>3</sup>/год [Государственный..., 2021]. С начала 1990-х гг. по настоящее время фосфорная нагрузка сточных вод значительно сократилась – с 109 до 12 т/год [Тимакова и др., 2014; Литвинова и др., 2021]. С 2000 г. в заливе появился новый источник биогенной нагрузки – форелевые хозяйства (11 форелевых хозяйств с общей мощностью ~3900 т/год) [Теканова и др., 2019; Galakhina et al., 2022].

### *Материалы для анализа и методы исследования*

Основу для анализа составляли данные, полученные в результате комплексных гидробиологических съемок в Онежском озере с 1988 по 2021 г. на постоянных точках (рис. 1) и организованные в базы данных [Сярки, Куликова, 2012; Сярки и др., 2015]. Анализ среднемноголетних закономерностей вертикального распределения проводился по данным гидробиологических съемок на постоянных станциях в центральной (К6) и вершинной (К3) части Кондопожского залива. Для сравнения использованы данные по зоопланктону залива Большое Онего (В1). Районы исследования различались по морфометрическим особенностям, характеристикам водообмена, термическому режиму и трофическим условиям, определяемым содержанием фито- и бактериопланктона. Среднемноголетние величины годовой первичной продукции различаются от 69,9 г С/м<sup>2</sup> в вершинной части, до 36,2 и 15,5 в центральной и в заливе Большое Онего соответственно [Теканова, 2019].

Зоопланктон отбирался сетью Джеди с установленным замыкателем (диаметр 19 или 25 см с диаметром пор 100 мкм). Отборы

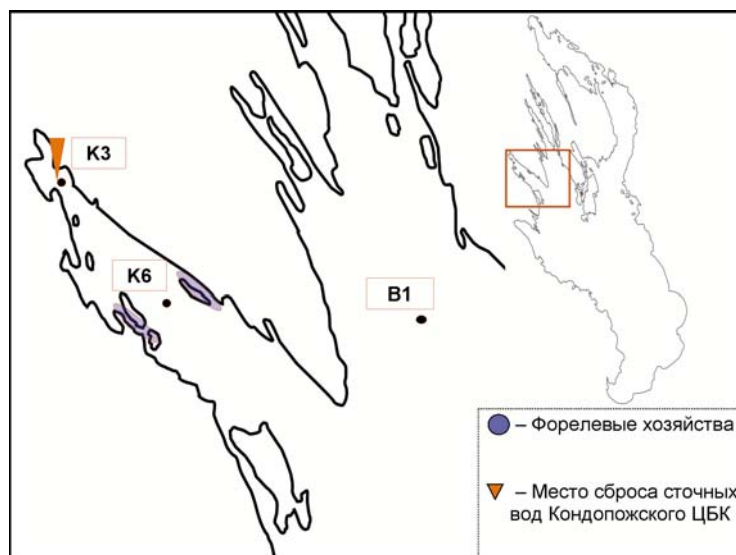


Рис. 1. Станции отбора проб  
Fig. 1. Sampling stations

производились в зависимости от глубины станции (табл. 1) на стандартных горизонтах (0–5, 5–10, 10–25, 25–50, 50–75, 75–дно).

Таблица 1. Станции отбора зоопланктона  
Table 1. Zooplankton sampling stations

| Станция<br>Station | Координаты станции<br>Coordinates of station | Средняя глубина, м*<br>Average depth, m |
|--------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| K3                 | 62°10'13" с. ш.<br>34°16'12" в. д.           | 12,5 (9–17)                             |
| K6                 | 62°04'57" с. ш.<br>34°27'04" в. д.           | 75 (60–81,5)                            |
| B1                 | 62°04'46" с. ш.<br>34°51'14" в. д.           | 80 (65–110)                             |

Примечание. \*В скобках – мин.–макс. значения.  
Note. \*In parenthesis – Min–Max.

Камеральная обработка проб проводилась по стандартной методике с учетом индивидуальных весов массовых видов Онежского озера [Куликова, Сярки, 1994; Методы..., 2024]. Идентификация видов выполнялась согласно «Определителю зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России» [2010].

Для анализа использовались ловы по стандартным горизонтам, что позволяло корректно сравнивать величины обилия зоопланктона по различным станциям, сезонам и годам. Массив данных по станциям составлял в вершинной части залива (станция K3) 93 пробы, в центральной части – 149, в заливе Большое Онего – 144. В связи с методическими особенностями послойного облова в разные периоды исследования данные были пересчитаны и приведены к стандартному виду в три слоя: 1-й – 0–5 м,

2-й – 5–10 м, 3-й – глубже 10 м. Проведен анализ величин обилия организмов зоопланктона в каждом слое (в м<sup>3</sup> и под м<sup>2</sup>). Также вычислялась доля численности и биомассы зоопланктона по слоям относительно всего столба воды.

Анализ среднемноголетней сезонной динамики показателей производился на основе сглаживания временных рядов, свернутых по показателю сезонности (сутки с начала года). Сглаживание производилось с помощью метода скользящего среднего в модификации двойного сглаживания для нерегулярных рядов с шагом в 7 элементов ряда [Сярки, 2013].

#### Сезонная динамика вертикального распределения температуры воды исследуемых районов

Параллельно отбору зоопланктона производились измерения температуры воды. Измерения температуры воды проводили с помощью глубоководного опрокидывающегося термометра (1964–2012 гг.) и мультипараметрического гидрологического зонда CTD-90M (2008–2022 гг.). На основе многолетних данных (1964–2022 гг.) по температуре воды пелагиали Онежского озера [Калинкина и др., 2023] выполнен анализ сезонного распределения температуры водной толщи на исследуемых станциях. Среднемноголетний сезонный вертикальный профиль температуры воды исследуемых станций формализован авторами с помощью метода взвешенной линейной регрессии (Weighted least squares).

Анализ данных проводился в среде Excel и Statistica 8.

## Результаты исследования

### Термический режим исследуемых районов

Для описания закономерностей сезонной динамики вертикального распределения зоопланктона был формализован термический режим исследуемых районов (рис. 2). Установлены пространственные различия в сроках наступления фаз термического режима, играющих роль в функционировании планктонных сообществ. К этим фазам в исследуемом периоде относятся биологическое лето, установление прямой температурной стратификации, период максимального прогрева воды, сезонное заглубление эпилимниона, весенняя и осенняя гомотермия. В вершинной части залива ввиду небольшой глубины биологическое лето наступает раньше и длится дольше, чем в других исследуемых районах. Кроме того, в период максимального прогрева воды (конец июля – начало августа) вся толща воды прогрета до  $>10^{\circ}\text{C}$ . Подобное явление не наблюдается в центральной части залива и в заливе Большое Онего.

В вершинной части поверхностные слои воды прогреваются до  $10^{\circ}\text{C}$  во второй половине мая. Слой на глубине 5 м прогревается до  $10^{\circ}\text{C}$  к концу мая. Заглубление прогретых до температуры более  $10^{\circ}\text{C}$  вод до 10-метрового слоя происходит во второй декаде июля и продолжается до начала октября. К середине августа слои выше 10 м прогреваются до  $15^{\circ}\text{C}$  и практически исчезает гипolimнион или слой с температурами ниже  $10^{\circ}\text{C}$ . Максимальные температуры на поверхности отмечаются в конце июля – начале августа и достигают в среднем  $20^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура воды  $22,7^{\circ}\text{C}$  отмечена в 1988 г.

В центральной части залива термобар проходит в конце мая и поверхностный слой достигает температуры  $10^{\circ}\text{C}$  в первой декаде июня. Слой воды на глубине 10 м прогревается до температуры в  $10^{\circ}\text{C}$  в первой декаде июля. Среднемноголетний максимум  $21\text{--}22^{\circ}\text{C}$  в этом районе отмечается в первой декаде августа. Максимальные температуры на станции К6, измеренные термометром, отмечены в 1984 г. и составляют  $24,4^{\circ}\text{C}$  [Калинкина и др., 2023], измеренные термодатчиками в 2018 г. составляют  $21,4^{\circ}\text{C}$ .

В заливе Большое Онего сезонный характер распределения температур сходен с таковым в центральной части залива, но сроки прогрева сдвинуты примерно на декаду. Термобар проходит в среднем в первой декаде июня. Во второй декаде июня поверхность воды прогревается до  $10^{\circ}\text{C}$ , а к концу месяца прогрев достигает 5 м.

Во второй декаде июля 10-метровый слой прогревается до  $10^{\circ}\text{C}$ . Максимальные температуры отмечаются в конце июля – начале августа и колеблются около  $20^{\circ}\text{C}$ . Максимально отмеченная температура  $20,2^{\circ}\text{C}$  наблюдалась в 2007 г.

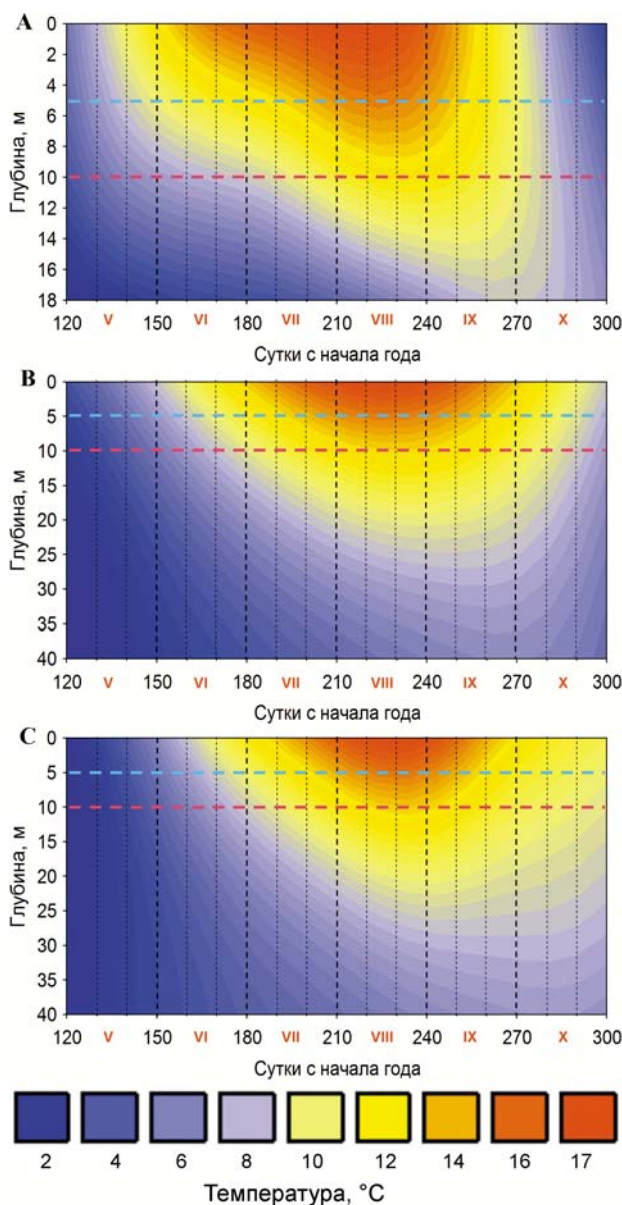


Рис. 2. Среднемноголетнее вертикальное распределение температуры по районам за вегетационный период:

А – вершинная часть залива, В – центральная часть залива, С – залив Большое Онего. На фрагментах В и С представлен верхний 40-метровый слой, реальные глубины – в табл. 1

Fig. 2. Average annual vertical temperature distribution by region during the growing season:

А – the upper part of the bay, В – the central part of the bay, С – Bolshoe Oнего Bay. Fragments В and С show the upper 40-meter layer, see real depths in Table 1

Основные закономерности термического режима на глубоководных станциях в центральной части Кондопожского залива (К6) и заливе Большое Онего (В1) схожи: в период летней стратификации здесь выделяются все три слоя (рис. 2, В, С). Благодаря большим глубинам станций в них имеется мощный слой гипolimниона.

*Сезонная динамика распределения зоопланктона в условиях гидротермической стратификации*

Некоторой проблемой является сопоставление стандартных слоев облова и слоев стратификации, имеющих варьирующую по сезонам и годам толщину. Так, показатели обилия зоопланктона зависят от толщины эпилимниона, которая может изменяться от 1 м в начале весеннего прогрева до 20 м в конце августа и зависит не только от сезона, но и от скорости весеннего прогрева воды и волнового перемешивания (рис. 2).

Основные закономерности вертикального распределения зоопланктона в столбе воды синхронно соответствуют явлениям термического режима по среднесезонным датам и пространственным масштабам. В период прямой стратификации с июня до сентября слой 0–5 м включает в себя эпилимнион. Этот слой примерно соответствует фотическому слою (прозрачность 2–2,5 м по диску Секки) и является наиболее продуктивным. Слои ниже 10 м могут характеризоваться как гипolimнион.

Промежуточный слой 5–10 м может включать в себя в разные периоды слой скачка, нижнюю часть эпилимниона и верхнюю часть гипolimниона. Но его вклад в количественные показатели зоопланктона невелик и составляет от 10 до 20 % в зависимости от фазы гидротермического режима (рис. 3).

*Сезонные закономерности вертикального распределения зоопланктона глубоководной части Кондопожского залива*

Формализация сезонной динамики вертикального распределения зоопланктона в центральной части Кондопожского залива (ст. К6) представлена на рис. 3.

В сезонной динамике вертикального распределения зоопланктона можно выделить несколько фаз, различающихся по соотношению обилия между слоями: весеннюю, летнюю и осеннюю.

Первая фаза в центральной части залива начинается после схода льда и соответствует весеннему периоду (рис. 2, В), когда количественные показатели зоопланктона еще невысоки (на 20 мая 4 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 0,045 г/м<sup>3</sup>). В этот период основное население зоопланктона сосредоточено в слоях ниже 10 м.

Вторая фаза начинается в 1–2 декаде июня с появлением устойчивой прямой стратификации и прогрева слоя до 5 м выше 10 °С. Поверхностные слои, обладая лучшими температурными и трофическими условиями,

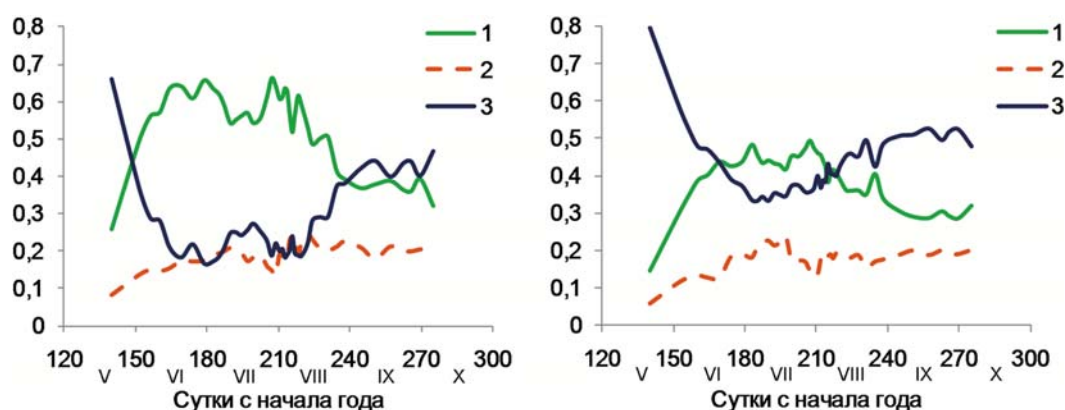


Рис. 3. Сезонные изменения доли численности (слева) и биомассы (справа) зоопланктона по слоям в столбе воды центральной части Кондопожского залива (ст. К6):

0–5 м – зеленый, 5–10 м – красный, > 10 м – синий

Fig. 3. Seasonal changes in the proportion of zooplankton abundance (left) and biomass (right) by layers in the water column of the central part of Kondopoga Bay (station K6):

Layer 0–5 m – green, layer 5–10 m – red, layers > 10 m – blue

становятся оптимальными для развития зоопланктона. В июле начинается массовое развитие коловраток с максимальной концентрацией их в слое 0–5 м. Максимальный прогрев поверхностных вод в среднем отмечается в конце июля – начале августа (рис. 2, В). В это время отмечаются среднееголетние максимумы обилия зоопланктона (1 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 0,3 г/м<sup>3</sup> или 70–80 тыс. экз./м<sup>2</sup> и 20–25 г/м<sup>2</sup>), что отражается в вертикальной структуре сообщества. Доля зоопланктона в слое 0–5 м достигает 70–80 % по численности и до 60 % по биомассе (рис. 3). В августе происходит прогрев свыше 15 °С до 10 м и граница воды с температурой 10 °С опускается до 20 м. Происходит выравнивание обилия организмов в слоях выше 5 и ниже 10 м.

Третья фаза начинается в конце сентября – октябре и характеризует осеннее перераспределение зоопланктона по слоям. Постепенное охлаждение поверхностных слоев воды вызывает миграцию зоопланктона в слои ниже 10 м.

*Вертикальное распределение зоопланктона вершинной части Кондопожского залива*

Особенности вертикального распределения зоопланктона вершинной части залива определяются его относительной мелководностью и закрытостью этого района от ветрового перемешивания. Сроки схода льда и прогрева воды в этом районе отличаются от сроков центрального района (рис. 2, А), что определяет особый

характер вертикального распределения зоопланктона (рис. 4).

Данные наших исследований не охватывают весенний период в этом районе. Самые ранние наблюдения (20 мая) уже застают летнее состояние с преобладанием численности зоопланктона в слое 0–5 м, хотя биомасса в нижнем слое была незначительно выше, чем в верхнем (рис. 4).

Июнь и июль характеризуются увеличением неравномерности вертикального распределения зоопланктона, когда большая часть организмов сосредотачивается в верхних слоях. В августе толщина прогретого выше 15 °С слоя превышает 5 м, слой с температурой более 10 °С достигает дна (рис. 2, А), что способствует выравниванию температурных условий по всей глубине. Со второй декады августа до октября обилие зоопланктона по слоям выравнивается (рис. 4) и перестает определяться температурными условиями.

*Сравнение процессов динамики вертикального распределения зоопланктона в Кондопожском заливе и заливе Большое Онего*

Анализ влияния различных факторов на пространственное распределение зоопланктона проведен на основе сравнения процессов на близких по глубинам и температурному режиму станциях в центральной части Кондопожского залива (К6) и в заливе Большое Онего (В1). Как показано ранее (рис. 3), вклад слоя 5–10 м в вертикальное распределение

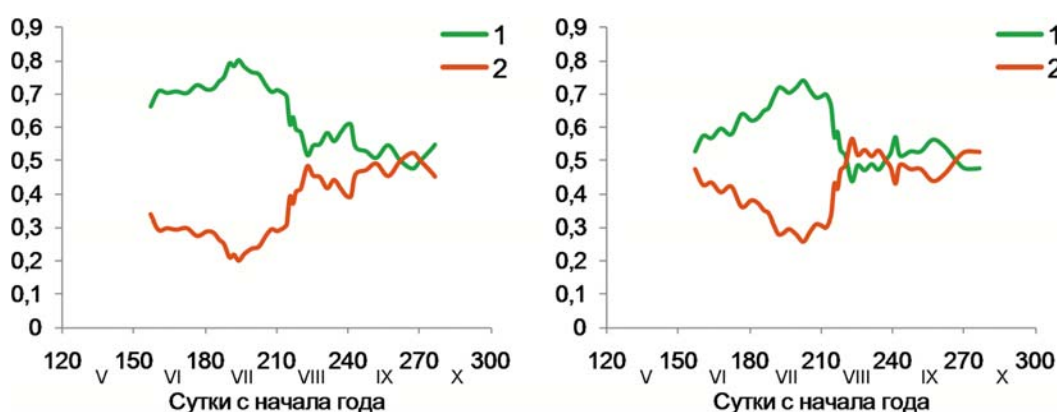


Рис. 4. Сезонные изменения доли численности (слева) и биомассы (справа) зоопланктона по слоям в столбе воды вершинной части Кондопожского залива (ст. К3):

0–5 м – зеленый, > 5 м – красный

Fig. 4. Seasonal changes in the proportion of zooplankton abundance (left) and biomass (right) by layers in the water column of the upper part of Kondopoga Bay (station K3):

Layer 0–5 m – green, layer > 5 m – red

зоопланктона незначителен, поэтому здесь рассматриваются только верхний 5-метровый слой и слой ниже 10 м.

Общие закономерности сезонных изменений вертикального распределения зоопланктона по районам в целом сходны: фазы, описанные ранее, характерны для обоих крупных глубоководных районов (рис. 5). Наибольшие различия отмечаются во временном сдвиге весной, когда перераспределение организмов между слоями в Кондопожском заливе происходит на две декады раньше, чем в от-

крытом озере. Это явление определяется сроками прохождения термобара и прогрева вод (рис. 2, А, В). В июле и августе термическая обстановка по озеру выравнивается и распределение зоопланктона по слоям приобретает сходный характер с концентрированием организмов в приповерхностном слое. В августе (рис. 5) наблюдается накопление биомассы зоопланктона в глубоких слоях.

Анализ динамики абсолютных показателей по слоям отражает различный характер их среднееголетней траектории (рис. 6).

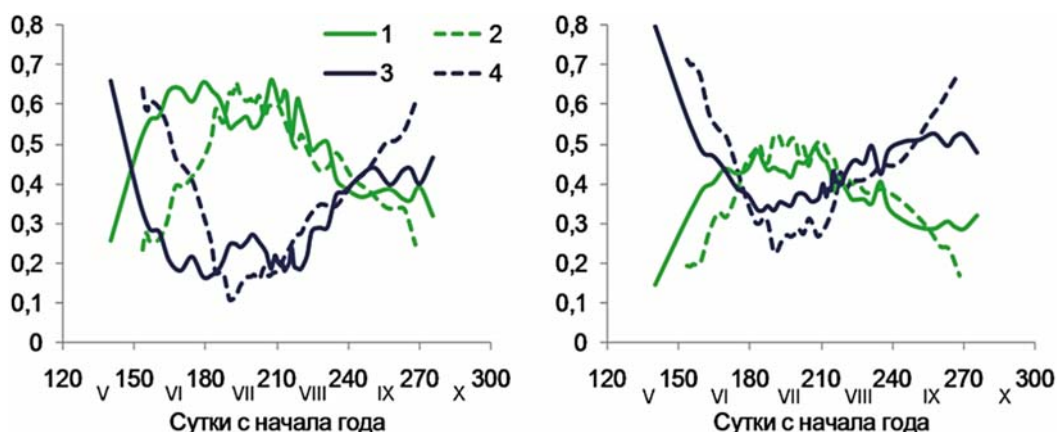


Рис. 5. Сезонные изменения доли численности (слева) и биомассы (справа) зоопланктона по слоям в центральной части Кондопожского залива (К6) и в заливе Большое Онего (В1): 1 – слой < 5 м на ст. К6, 2 – слой < 5 м на ст. В1, 3 – слой > 10 м на ст. К6, 4 – слой > 10 м на ст. В1

Fig. 5. Seasonal changes in the proportion of zooplankton abundance (left) and biomass (right) by layers in the central part of Kondopoga Bay (K6) and in the Bolshoe Oнего Bay (B1): 1 – layer < 5 m at station K6, 2 – layer < 5 m at station B1, 3 – layer > 10 m at station K6, 4 – layer > 10 m at station B1

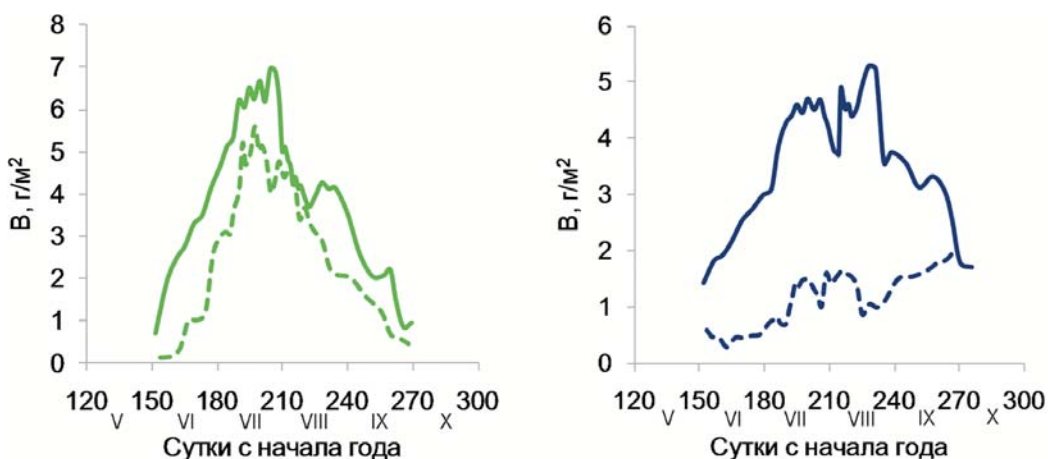


Рис. 6. Сезонная динамика биомассы зоопланктона ( $B$ ,  $г/м^2$ ) в слое 0–5 м (слева) и в слое глубже 10 м (справа) на станции К6 (сплошная линия) и В1 (пунктир)

Fig. 6. Seasonal dynamic of zooplankton biomass ( $B$ ,  $г/м^2$ ) in a layer of 0–5 m (left) and in a layer deeper than 10 m (right) at stations K6 (solid lines) and B1 (dashed lines)

Закономерности сезонной динамики в верхнем 5-метровом слое близки в обоих заливах: имеются весенняя восходящая и осенняя нисходящая ветви, а также летний пик. Различия термического режима и трофических условий по районам отражаются в сроках развития и небольших отличиях в максимуме обилия зоопланктона. В слое глубже 10 м проявляется иной характер динамики. Если в заливе Большое Онего обилие зоопланктона в этом слое невысоко на протяжении всего вегетационного периода – в нем сосредоточено около 30 % биомассы, то в Кондопожском заливе в летний период этот слой обеспечивает 35–40 % биомассы зоопланктона. Основное население глубоких слоев пелагиали Онежского озера представлено крупными каляноидными рачками *L. macrurus*, *E. gracilis* [Куликова и др., 1997]. В центральной части Кондопожского залива в летний период происходит более интенсивное накопление биомассы зоопланктона в гипolimнионе. Данное явление требует дальнейших исследований.

Обсуждение результатов

Температурные условия исследуемых районов

Полученные профили (рис. 2) свидетельствуют об особенностях термического режима исследуемых районов и согласуются с литературными данными [Онежское..., 2010]. Различия в сроках установления основных фаз гидро-термического режима и их продолжительности вызваны морфометрическими особенностями районов исследования, а также глубинами

[Онежское..., 2010]. Короткий вегетационный период определяется холодноводностью Онежского озера и является характерной особенностью сезонной цикличности функционирования гидробионтов [Теканова и др., 2018]. Температурные условия вершинной части залива благодаря мелководности и закрытости акватории обеспечивают более раннее начало биологического лета и длинный период вегетации.

Различия трофических условий исследуемых районов

Многолетние исследования состояния зоопланктона Кондопожского залива показали, что его обилие тесно связано с трофическими условиями [Тимакова и др., 2014; Сярки, Фомина, 2019б]. С 80-х годов прошлого века в заливе наблюдается ярко выраженный градиент концентрации органического вещества и биогенных элементов от места сброса сточных вод ЦБК до его открытой части [Онежское..., 2010; Тимакова и др., 2014; Сабылина, 2015; Теканова, 2019]. В настоящее время в центральной части залива развито разведение форели в садковых хозяйствах, что вызывает вспышки обилия фитопланктона и появление новых источников биогенного органического вещества [Galakhina et al., 2022; Смирнова и др., 2024].

Общее обилие зоопланктона определяется градиентом трофических условий. Самые высокие показатели обилия зоопланктона отмечаются обычно в вершинной части залива (табл. 2) [Сярки, Фомина, 2019б]. В центральной части залива обилие ниже, чем в вершинной части, но выше, чем в заливе Большое Онего (табл. 2).

Таблица 2. Количественные показатели зоопланктона в летний период (конец июля – начало августа)  
Table 2. Abundance of zooplankton in summer period (late July – early August)

| Район (n)<br>Place (n)                                     | Средняя N ± ошибка среднего<br>Min–Max<br>Average N ± SE<br>Min–Max |                                  | Средняя B ± ошибка среднего<br>Min–Max<br>Average B ± SE<br>Min–Max |                           |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|                                                            | тыс. экз./м³<br>thousand ind./m³                                    | тыс. экз./м²<br>thousand ind./m² | г/м³<br>g/m³                                                        | г/м²<br>g/m²              |
| Вершинная часть (16)<br>The upper part of the bay (16)     | 88,98 ± 19,06<br>21,83–333,18                                       | 1014,38 ± 217,36<br>248,9–3798,3 | 1,9 ± 0,39<br>0,66–5,58                                             | 21,74 ± 4,56<br>7,52–63,6 |
| Центральная часть (19)<br>The central part of the bay (19) | 6,36 ± 0,58<br>3,38–12,68                                           | 467,59 ± 42,81<br>248,86–932,3   | 0,18 ± 0,02<br>0,09–0,38                                            | 13,49 ± 1,5<br>7,16–28,29 |
| Большое Онего (14)<br>Bolshoe Onego Bay (14)               | 3,68 ± 0,55<br>0,88–7,18                                            | 287,18 ± 43,4<br>68,97–560,53    | 0,1 ± 0,01<br>0,02–0,18                                             | 8,4 ± 1,04<br>2,15–14,56  |

Примечание. N – общая численность; B – общая биомасса; n – число проб.  
Note. N – total number; B – total biomass; n – number of samples.

Структура сообществ также имеет связь с трофическими условиями. В вершинной части отмечено необычное для Онежского озера преобладание ветвистоусых рачков. Характер структуры зоопланктона в центральной части Кондопожского залива приобретает обычные для пелагиали Онежского озера черты с преобладанием веслоногих рачков [Куликова и др., 1997; Сярки, Фомина, 2019a].

*Особенности сезонной динамики  
вертикального распределения  
зоопланктона исследуемых районов*

Сезонные вертикальные миграции зоопланктона в озерных экосистемах известны как процесс адаптации популяций организмов к закономерно изменяющимся условиям среды [Bandara et al., 2021]. Это явление особенно прослеживается в стратифицированных озерах, к которым относится и Онежское озеро, поскольку в них наблюдаются вертикальные градиенты физических, химических и биологических процессов и компонентов [Ringelberg 1999; Wetzel, 2001]. Откликом на неравномерное вертикальное распределение факторов среды в водных экосистемах является перемещение планктеров в поисках оптимальных условий [Lampert et al., 2003].

Температурный режим водоемов известен как один из главных факторов, вызывающих сезонные вертикальные миграции зоопланктона [Thackeray et al., 2005; Brönmark, Hansson, 2018]. Выделенные фазы температурного режима пелагиали Онежского озера отражены и в сезонном цикле вертикального распределения зоопланктона. Например, период быстрого роста численности зоопланктона по срокам совпадает с появлением прямой температурной стратификации [Фомина, Сярки, 2018; Гончаров и др., 2022]. А осеннее охлаждение поверхности воды с заглублением эпилимниона приводит к снижению обилия в поверхностных слоях (рис. 6) и увеличению доли более глубоких слоев в общем обилии зоопланктона в столбе воды.

Общие закономерности вертикального распределения зоопланктона в центральном районе Кондопожского залива за вегетационный период являются обычными для димиктических озер и водохранилищ [Куликова и др., 1997; Кипрушина, 2009]. Явления гидротермического режима – весеннее и осеннее перемешивание, обратная зимняя и прямая летняя стратификация – определяют вертикальное распределение зоопланктона. За вегетационный период сезонная динамика вертикального распределения

зоопланктона по слоям разбивается на три фазы: весеннюю, летнюю и осеннюю.

Как показано ранее (рис. 2), температурные условия пелагиали двух глубоководных районов исследования в конце июля – начале августа имеют сходный характер, однако в вертикальном распределении зоопланктона наблюдаются различия. Накопление биомассы зоопланктона в глубинных слоях воды в центральной части Кондопожского залива, по-видимому, связано с трофическими условиями этого района. Необходимы дальнейшие исследования сезонных изменений вертикального распределения пищевых ресурсов зоопланктона, чтобы подтвердить или опровергнуть эту гипотезу.

## **Заключение**

Сезонная динамика вертикального распределения зоопланктона по слоям определяется вертикальной неоднородностью среды. Одним из главных ее факторов является температурный режим, проявляющийся в сроках основных гидрологических явлений и масштабе стратификации вод. По характеру вертикального распределения зоопланктона вегетационный период подразделяется на весенний, летний и осенний.

Общие сезонные закономерности вертикального распределения зоопланктона, характерные для пелагиали Онежского озера, отмечаются и для зоопланктона центральной части Кондопожского залива. Особенностью сезонных процессов в зоопланктоне этого района является более интенсивное, по сравнению с олиготрофными районами озера, накопление биомассы рачкового планктона в глубоких слоях гипolimниона. В период максимального развития зоопланктона (конец июля – начало августа) биомасса в гипolimнионе пелагиали центральной части Кондопожского залива в 2–3 раза выше, чем в заливе Большое Онего.

Особенности вертикального распределения зоопланктона в Кондопожском заливе определяются глубиной района озера и сроками прогрева. В мелководной вершинной части залива различия обилия зоопланктона по слоям существуют в первой половине лета до начала августа, после чего соотношение его количества по слоям выравнивается до октября.

Исследование сезонной динамики вертикального распределения зоопланктона в столбе воды позволит уточнить закономерности функционирования пелагического планктона по районам в условиях различных по температурному режиму лет, что актуально при изменении климата.

## Литература

- Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрологический режим. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.
- Баянов Н. Г., Ананьев П. Н. Температурный, кислородный режимы и динамика прозрачности вод озера Светлояр в 2010–2014 гг. // Труды Государственного природного заповедника «Керженский». 2015. Т. 7. С. 60–75.
- Гончаров А. В., Болотов С. Э., Пуклаков В. В., Малащенко Д. В., Ерина О. Н., Ломов В. А. Вертикальная структура вод и планктон водохранилища в весенний период // Биология внутренних вод. 2022. № 4. С. 395–403. doi: 10.31857/S0320965222040106
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 году / Ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск, 2021. 277 с.
- Калинкина Н. М., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В. Научные основы биомониторинга Онежского озера // ДАН. 2018. Т. 482, № 1. С. 92–95. doi: 10.31857/S086956520003229-4
- Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т., Георгиев А. П., Исакова К. В., Толстиков А. В., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла а, продукция фитопланктона. Св-во о госрегистрации базы данных № 2023621189. Правообладатель: КарНЦ РАН (RU). Дата регистрации: 12 апреля 2023 г.
- Кипрушина К. Н. Сезонная динамика вертикального распределения зоопланктона открытой части Южного Байкала (район Больших Котов) // Известия Иркутского государственного университета. 2009. Т. 2, № 1. С. 39–44.
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 395 с.
- Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1997. 112 с.
- Куликова Т. П., Сярки М. Т. Размерно-весовая характеристика массовых видов ракообразных и коловраток Онежского озера: Справочно-информационный материал. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1994. 15 с.
- Лазарева В. И., Соколова Е. А. Динамика и фенология зоопланктона крупного равнинного водохранилища: отклик на изменение климата // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133, № 6. С. 564–574.
- Литвинова И. А., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Макарова Е. М., Ефимова А. Н. Антропогенная нагрузка и биоиндикация состояния Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). База данных. Св-во о госрегистрации № 2021620975. Правообладатель: КарНЦ РАН (RU). Дата регистрации: 17 мая 2021 г.
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303
- Методы гидробиологических исследований внутренних вод / Ред. А. В. Крылов. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.
- Онежское озеро. Атлас / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Ред. В. Р. Алексеев, С. Я. Цалолихин. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 495 с.
- Сабылина А. В. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрохимические исследования. Внешняя нагрузка на озеро // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 68–72.
- Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.
- Смирнова В. С., Теканова Е. В., Калинкина Н. М. Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях садкового выращивания форели // Трансформация экосистем. 2024. Т. 7, № 1. С. 177–195. doi: 10.23859/estr-220822
- Сярки М. Т. Подходы и методы исследования сезонной динамики зоопланктона крупного озера // Принципы экологии. 2024. № 4. С. 48–58. doi: 10.15393/j1.art.2024.15263
- Сярки М. Т. Изучение траектории сезонной динамики планктона с помощью метода двойного сглаживания // Принципы экологии. 2013. Т. 2, № 1. С. 61–67.
- Сярки М. Т. Оценка современного состояния экосистемы Онежского озера по гидробиологическим показателям и устойчивости функционирования водных сообществ. Зоопланктон // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России. Современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 121–127.
- Сярки М. Т., Куликова Т. П. Зоопланктон Онежского озера. Св-во о госрегистрации базы данных № 2012621150. Правообладатель: ИВПС КарНЦ РАН (RU). Дата регистрации: 9 ноября 2012 г.

Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Планктон пелагиали Онежского озера. Св-во о госрегистрации базы данных № 2015620274. Право-обладатель: ИВПС КарНЦ РАН (RU). Дата регистра-ции: 13 февраля 2015 г.

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Зоопланктон Онеж-ского озера, его Центрального плеса и залива Боль-шое Онего в различные по температурному режиму годы // Труды Карельского научного центра РАН. 2019а. № 9. С. 104–115. doi: 10.17076/lim982

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Современное состо-яние зоопланктона Кондопожского залива Онеж-ского озера // Водные биоресурсы и среда оби-тания. 2019б. Т. 2, № 3. С. 33–40. doi: 10.47921/2619-1024\_2019\_2\_3\_33

Теканова Е. В. Многолетние изменения первич-ной продукции в Кондопожской губе Онежского озе-ра (Россия) под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Sciences of Europe. 2019. № 35-2(35). С. 26–30.

Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Кравченко И. Ю. Геохимические особенности функционирования биоты в водоемах Карелии // Известия РАН. Сер. геогр. 2018. № 1. С. 90–100. doi: 10.7868/S2587556618010083

Теканова Е. В., Рыжаков А. В., Калинкина Н. М., Дмитриева Д. А., Фомина Ю. Ю., Макарова Е. М. Состояние экосистемы Кондопожской губы Онеж-ского озера в условиях многофакторного воздейст-вия // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Мат-лы II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань, 2019. С. 190–194.

Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекры-жева Т. А. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресур-сы. 2014. Т. 41, № 1. С. 74–82.

Фенева И. Ю., Разлуцкий В. И., Палаш А. Л., Туновски Я., Зилитинкевич Н. С. Вертикальное рас-пределение планктонных ракообразных в мезо-эвтрофных озерах с разным термическим режимом // Зоологический журнал. 2016. Т. 95, № 2. С. 153–166. doi: 10.7868/S0044513416020082

Фомина Ю. Ю. Влияние термического режима на сезонную динамику зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера // Исследования Русского Се-вера: экология, история, наследие. Вологда, 2022. С. 240–246.

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Современное состо-яние зоопланктона Петрозаводской губы Онежско-го озера и его отклик на изменение климата // Тру-ды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 54–64. doi: 10.17076/lim820

Bandara K., Varpe Ø., Wijewardene L., Tver-berg V., Eiane K. Two hundred years of zooplankton ver-tical migration research // Biol. Rev. 2021. Vol. 96, no. 4. P. 1547–1589. doi: 10.1111/brv.12715

Brönmark C., Hansson L. A. The biology of lakes and ponds. Third Edition. Oxford university press, 2018. 216 p. doi: 10.1093/oso/9780198713593.001.0001

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and tempo-ral changes for the last three decades with special

reference to nutrient concentrations // Environ. Nano-technol. Monitor. Manag. 2022. Vol. 17. P. 100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Halliday S. J., Wade A. J., Skeffington R. A., Neal C., Reynolds B., Rowland P., Neal M., Norris D. An analysis of long-term trends, seasonality and short-term dynamics in water quality data from Plynlimon, Wales // Sci. Total Environ. 2012. Vol. 434. P. 186–200. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.10.052

Izmest'eva L. R., Moore M. V., Hampton S. E., Ferwerda C. J., Gray D. K., Woo K. H., Pislegina H. V., Krashchuk L. S., Shimaraeva S. V., Silow E. A. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 2016. Vol. 42. P. 6–17. doi: 10.1016/j.jglr.2015.11.006

Lampert W., McCauley E., Manly B. F. J. Trade-offs in the vertical distribution of zooplankton: ideal free dis-tribution with costs? // Proceedings of the Royal Society B. 2003. Vol. 270, iss. 1516. P. 765–773. doi: 10.1098/rspb.2002.2291

Matsuzaki S. I. S., Lathrop R. C., Carpenter S. R., Walsh J. R., Vander Zanden M. J., Gahler M. R., Stanley E. H. Climate and food web effects on the spring clear-water phase in two north-temperate eutrophic lakes // Limnol. Oceanogr. 2020. Vol. 66, no. 1. P. 30–46. doi: 10.1002/lno.11584

Rajwa-Kuligiewicz A., Bialik R. J., Rowiński P. M. Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales // J. Hydrol. Hydromech. 2015. Vol. 63, no. 4. P. 353–363. doi: 10.1515/johh-2015-0041

Ringelberg J. The photobehaviour of *Daphnia* spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplank-ton // Biol. Rev. 1999. Vol. 74, no. 4. P. 397–423. doi: 10.1111/j.1469-185X.1999.tb00036.x

Thackeray S. J., George D. G., Jones R. I., Win-field I. J. Vertical heterogeneity in zooplankton commu-nity structure: a variance partitioning approach // Archiv für Hydrobiologie. 2005. Vol. 164, no. 2. P. 257–275. doi: 10.1127/0003-9136/2005/0164-0257

Thackeray S. J., George D. G., Jones R. I., Win-field I. J. Statistical quantification of the effect of thermal stratification on patterns of dispersion in a freshwater zooplankton community // Aquat. Ecol. 2006. Vol. 40. P. 23–32. doi: 10.1007/s10452-005-9021

Wagner C., Adrian R. Exploring lake ecosys-tems: hierarchy responses to long-term change? // Global Change Biol. 2009. Vol. 15. P. 1104–1115. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01833.x

Wetzel R. G. Limnology: lake and river ecosystems: third edition. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 p.

Wilson H. L., Ayala A. I., Jones I. D., Rolston A., Pierson D., de Eyto E., Grossart H.-P., Perga M.-E., Woolway R. I., Jennings E. Variability in epilimnion depth estimations in lakes // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. Vol. 24, no. 11. P. 5559–5577. doi: 10.5194/hess-24-5559-20

## References

Alekseev V. R., Tsalolikhin S. Ya. (eds.). An identifi-cation guide to zooplankton and zoobenthos in fresh wa-ters of European Russia. Vol. 1. Zooplankton. Moscow: KMK; 2010. 495 p. (In Russ.)

- Balaganskii A. F., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Salo Yu. A. Current state and changes in the Lake Onego ecosystems (Verkhne-Svirsky Reservoir). Hydrological regime. River flow resources and water balance. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozmozhnostyakh = The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 31–38. (In Russ.)
- Bandara K., Varpe Ø., Wijewardene L., Tverberg V., Eiane K. Two hundred years of zooplankton vertical migration research. *Biol. Rev.* 2021;96(4):1547–1589. doi: 10.1111/brv.12715
- Bayanov N. G., Anan'ev P. N. Temperature, oxygen conditions and dynamics of transparency of Lake Svetloyar waters in 2010–2014. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Kerzhenskii» = Proceedings of the Kerzhensky State Nature Reserve*. 2015;7:60–75. (In Russ.)
- Brönmark C., Hansson L. A. The biology of lakes and ponds. Third Edition. Oxford University Press; 2018. 216 p. doi: 10.1093/oso/9780198713593.001.0001
- Feneva I. Yu., Razlutskiy V. I., Palash A. L., Tunovskiy Ya., Zilitinkevich N. S. Vertical distribution of planktonic crustaceans in meso-eutrophic lakes with different thermal conditions. *Zoologicheskii Zhurnal*. 2016;95(2):153–166. (In Russ.). doi: 10.7868/S0044513416020082
- Filatov N. N. (ed.). Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)
- Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)
- Fomina Yu. Yu. The influence of the thermal regime on the seasonal dynamics of zooplankton in Petrozavodsk Bay of Lake Onega. *Issledovaniya Russkogo Severa: ekologiya, istoriya, nasledie = Research of the Russian North: ecology, history, heritage*. Vologda; 2022. P. 240–246. (In Russ.)
- Fomina Yu. Yu., Syarki M. T. Modern state of zooplankton and its response to climate change in Petrozavodsk Bay of Lake Onega. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2018;9:54–64. (In Russ.). doi: 10.17076/lim820
- Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environ. Nanotechnol. Monitor. Manag.* 2022;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619
- Goncharov A. V., Bolotov S. E., Puklakov V. V., Malashenkov D. V., Erina O. N., Lomov V. A. Vertical water structure and reservoir plankton in spring. *Inland Water Biology*. 2022;4:395–403. (In Russ.). doi: 10.31857/S0320965222040106
- Gromtsev A. N. (ed.). The state report on the state of the environment in the Republic of Karelia in 2020. Petrozavodsk; 2021. 277 p. (In Russ.)
- Halliday S. J., Wade A. J., Skeffington R. A., Neal C., Reynolds B., Rowland P., Neal M., Norris D. An analysis of long-term trends, seasonality and short-term dynamics in water quality data from Plynlimon, Wales. *Sci. Total Environ.* 2012;434:186–200. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.10.052
- Izvest'eva L. R., Moore M. V., Hampton S. E., Ferwerda C. J., Gray D.K., Woo K. H., Pislegina H. V., Krashchuk L. S., Shimaraeva S. V., Silow E. A. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal. *J. Great Lakes Res.* 2016;42:6–17. doi: 10.1016/j.jglr.2015.11.006
- Kalinkina N. M., Polyakova T. N., Syarki M. T., Tekanova E. V. Scientific foundations of biomonitoring of Lake Onega. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Academy of Sciences*. 2018;482(1):92–95. (In Russ.). doi: 10.31857/S086956520003229-4
- Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Syarki M. T., Georgiev A. P., Isakova K. V., Tolstikov A. V., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. Limnological indicators of the state of Lake Onega and the Vygozersky Reservoir: water temperature, chlorophyll a concentration, phytoplankton production. The certificate of the state registration of database No. 2023621189. Copyright holder: KarRC RAS (RU). The date of the registration in the register of databases: 12.04.2023. (In Russ.)
- Kiprushina K. N. Seasonal dynamics of vertical distribution of zooplankton in the open part of Southern Baikal (Bol'shikh Kotov area). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta = The Bulletin of Irkutsk State University (Biology and Ecology Series)*. 2009;2(1):39–44. (In Russ.)
- Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 395 p. (In Russ.)
- Krylov A. V. (ed.). Methods of hydrobiological studies of inland waters. Yaroslavl': Filigran'; 2024. 592 p. (In Russ.)
- Kulikova T. P., Kustovlyankina N. B., Syarki M. T. Zooplankton as a component of the ecosystem of Lake Onega. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1997. 112 p. (In Russ.)
- Kulikova T. P., Syarki M. T. Size and weight characteristics of the mass species of crustaceans and rotifers of Lake Onega: reference and information material. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1994. 15 p. (In Russ.)
- Lampert W., McCauley E., Manly B. F. J. Trade-offs in the vertical distribution of zooplankton: ideal free distribution with costs? *Proceedings of the Royal Society B*. 2003;270(1516):765–773. doi: 10.1098/rspb.2002.2291
- Lazareva V. I., Sokolova E. A. Dynamics and phenology of zooplankton in a large lowland reservoir: response to climate change. *Uspekhi sovremennoi biologii = Advances in Current Biology*. 2013;133(6):564–574. (In Russ.)
- Litvinova I. A., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Makarova E. M., Efimova A. N. Anthropogenic load and bioindication of the state of Lake Onega (Verkhne-Svirsky Reservoir). The database. The certificate of the state registration of database No. 2021620975. Copyright holder: NWPI KarRC RAS (RU). The date of the registration in the register of databases: 17.05.2021. (In Russ.)

- Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Biogenic load on Lake Onega according to field observations. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;5:35–52. (In Russ.). doi: 10.17076/lim303
- Matsuzaki S. I. S., Lathrop R. C., Carpenter S. R., Walsh J. R., Vander Zanden M. J., Gahler M. R., Stanley E. H. Climate and food web effects on the spring clear-water phase in two north-temperate eutrophic lakes. *Limnol. Oceanogr.* 2020;66(1):30–46. doi: 10.1002/lno.11584
- Rajwa-Kuligiewicz A., Bialik R. J., Rowiński P. M. Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales. *J. Hydrol. Hydromech.* 2015;63(4):353–363. doi: 10.1515/johh-2015-0041
- Ringelberg J. The photobehaviour of *Daphnia* spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplankton. *Biol. Rev.* 1999;74(4):397–423. doi: 10.1111/j.1469-185X.1999.tb00036.x
- Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Chemical composition of the water of Lake Onega and its tributaries. *Water Resources*. 2010;37(6):717–729. (In Russ.)
- Sabylina A. V. Current state and changes in the ecosystem of Lake Onego (Verkhne-Svirsky Reservoir). Hydrochemical studies. External load on the lake. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 68–72. (In Russ.)
- Smirnova V. S., Tekanova E. V., Kalinkina N. M. Phytoplankton as an indicator of the ecosystem state of Kondopoga Bay of Lake Onego under cage trout farming. *Transformatsiya ekosistem = Ecosystem Transformation*. 2024;7(1):177–195. (In Russ.). doi: 10.23859/estr-220822
- Syarki M. T. Approaches and methods for studying the seasonal dynamics of zooplankton in a large lake. *Printsipy ekologii = Principles of the Ecology*. 2024;4: 48–58. (In Russ.). doi: 10.15393/j1.art.2024.15263
- Syarki M. T. Assessment of the current state of the ecosystem of Lake Onego according to hydrobiological indicators and the sustainability of the functioning of aquatic communities. Zooplankton. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 121–127. (In Russ.)
- Syarki M. T. Studying the trajectory of seasonal plankton dynamics using the double smoothing method. *Printsipy ekologii = Principles of the Ecology*. 2013; 2(1):61–67. (In Russ.)
- Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. The current state of zooplankton in the Kondopoga Bay of Lake Onega. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya = Water Resources and the Habitat*. 2019;2(3):33–40. (In Russ.). doi: 10.47921/2619-1024\_2019\_2\_3\_33
- Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. Zooplankton of Lake Onega, its Central Reach and Bolshoe Onego Bay in different temperature conditions in years. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;9:104–115. (In Russ.). doi: 10.17076/lim982
- Syarki M. T., Kulikova T. P. Zooplankton of Lake Onego. The certificate of the state registration of database No. 2012621150. Copyright holder: NWPI KarRC RAS (RU). The date of the registration in the register of databases: 9.11.2012. (In Russ.)
- Syarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. Plankton of the pelagic Lake Onega. The certificate of the state registration of database No. 2015620274. Copyright holder: NWPI KarRC RAS (RU). The date of the registration in the register of databases: 13.02.2015. (In Russ.)
- Tekanova E. V. Long-term changes in primary production in Kondopozhskaya Bay of Lake Onego (Russia) under the influence of waste water from pulp and paper mill. *Sciences of Europe*. 2019;35:26–30. (In Russ.)
- Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Kravchenko I. Yu. Geochemical peculiarities of biota functioning in water bodies of Karelia. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Proceedings of the Academy of Sciences. Ser.: Geography*. 2018;1:90–100. doi: 10.7868/S2587556618010083
- Tekanova E. V., Ryzhakov A. V., Kalinkina N. M., Dmitrieva D. A., Fomina Yu. Yu., Makarova E. M. The state of the ecosystem of Kondopoga Bay of Lake Onega under conditions of multifactorial impact. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mat-ly II Mezhdunar. konf. (Kazan', 19–24 maya 2019 g.) = Lakes of Eurasia: problems and solutions: Proceedings of the II Int. conf. (Kazan, May 19–24, 2019)*. Kazan'; 2019. P. 190–194. (In Russ.)
- Thackeray S. J., George D. G., Jones R. I., Winfield I. J. Vertical heterogeneity in zooplankton community structure: a variance partitioning approach. *Archiv für Hydrobiologie*. 2005;164(2):257–275. doi: 10.1127/0003-9136/2005/0164-0257
- Thackeray S. J., George D. G., Jones R. I., Winfield I. J. Statistical quantification of the effect of thermal stratification on patterns of dispersion in a freshwater zooplankton community. *Aquat. Ecol.* 2006;40:23–32. doi: 10.1007/s10452-005-9021
- Timakova T. M., Kulikova T. P., Litvinova I. A., Polyakova T. N., Syarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. Changes in biocenoses of Kondopoga Bay, Lake Onego, under the effect of effluents from a pulp and paper mill. *Water Resources*. 2014;41(1): 78–86. (In Russ.). doi: 10.1134/S0097807814010126
- Wagner C., Adrian R. Exploring lake ecosystems: hierarchy responses to long-term change? *Global Change Biol.* 2009;15:1104–1115. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01833.x
- Wetzel R. G. Limnology: lake and river ecosystems: third edition. San Diego: Academic Press; 2001. 1006 p.
- Wilson H. L., Ayala A. I., Jones I. D., Rolston A., Pierson D., de Eyto E., Grossart H.-P., Perga M.-E., Woolway R. I., Jennings E. Variability in epilimnion depth estimations in lakes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020;24(11):5559–5577. doi: 10.5194/hess-24-5559-20

Поступила в редакцию / received: 05.12.2024; принята к публикации / accepted: 11.07.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Сярки Мария Тагевна**

канд. биол. наук, главный биолог группы  
исследований донных отложений

*e-mail: msyarki@mail.ru*

**Коновалов Даниил Сергеевич**

инженер-исследователь лаборатории гидробиологии

*e-mail: konovalov.daniil1998@gmail.com*

#### **CONTRIBUTORS:**

**Syarki, Maria**

Cand. Sci. (Biol.), Chief Biologist

**Konovalov, Daniil**

Research Engineer

УДК 574.5

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕКСОВ РАЗНООБРАЗИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ПРОМЫСЛОВЫХ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Г. Т. Фрумин<sup>1\*</sup>, А. С. Шурухин<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга) (наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053)

В статье обсуждается актуальная проблема оценки динамики биологического разнообразия на примере промыслового рыбного населения Ладожского озера. Изменение структуры рыбной части озерного сообщества прослежено на материалах ихтиологических исследований и данных рыбопромысловой статистики за период 1946–2023 гг. Для математико-статистического анализа массив первичных данных промышленного вылова рыб был разделен на пятилетние периоды, кроме периода 2016–2023 гг. 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. В то же время достоверность оценки тенденции снижения разнообразия остается неоднозначным вопросом при применении различных индексов биоразнообразия. Целью данного исследования являлся сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия для оценки динамики видового разнообразия рыбного населения Ладожского озера. Использованы шесть следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского ( $\mu$ ), индекс Симпсона – индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D). Приведена матрица парных корреляций индексов биоразнообразия, примененных для оценки динамики разнообразия видовой структуры рыбного населения Ладожского озера. Установлена наибольшая информативность индексов Шелдона и Шеннона. С 1960 по 2023 г. величина индекса биоразнообразия Шелдона характеризуется высоким отрицательным трендом (по шкале Чеддока коэффициент корреляции  $r = 0,74$ ).

Ключевые слова: Ладожское озеро; эвтрофирование; рыбное население; динамика видового разнообразия; индексы биоразнообразия; математические модели

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Шурухин А. С. Применение индексов разнообразия для оценки динамики промысловых популяций рыб Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 97–105. doi: 10.17076/lim2102

## G. T. Frumin<sup>1\*</sup>, A. S. Shurukhin<sup>2</sup>. USING DIVERSITY INDICES TO ASSESS THE DYNAMICS OF COMMERCIAL FISH POPULATIONS IN LAKE LADOGA

<sup>1</sup>Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Moika River Emb., 191186 St. Petersburg, Russia), \*gfrumin@mail.ru

<sup>2</sup>St. Petersburg branch of the All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (GosNIORKh named after L. S. Berg) (26 nab. Makarova, 199053 St. Petersburg, Russia)

The article discusses the topical issue of assessing the dynamics of biological diversity through the case study of commercial fish populations of Lake Ladoga. Changes in the structure of fish community in the lake were traced using fishery statistics for the period 1946–2023. For the mathematical and statistical analysis, the primary dataset on industrial fish catches was divided into five-year periods, excluding the period 2016–2023 period. Despite the selectivity of harvesting, the structure of catches in long-term observation series quite adequately reflects the dynamics of the fish population and changes in its species diversity, represented by the catch composition and the biomass ratio of different fish species. However, the reliability of the assessment of the declining diversity trend is questionable when using different biodiversity indices. The purpose of this study was to comparatively analyze the performance of different biodiversity indices in assessing the dynamics of the species diversity of the fish population of Lake Ladoga. The following six indices were used: Shannon index (H), Pielou index (E), Sheldon index (SH), Zhivotovsky index ( $\mu$ ), Simpson's dominance (C) and diversity (D) indices. The matrix of pairwise correlations of biodiversity indices used to assess structural changes in the species diversity of the fish population of Lake Ladoga is presented. The Sheldon and Shannon indices were found to be the most informative. From 1960 to 2023, the Sheldon biodiversity index increased from 13.3 to 13.6, showing a high negative trend (correlation coefficient  $r = 0.74$  on the Chaddock scale).

**Keywords:** Lake Ladoga; eutrophication; fish population; dynamics of species diversity; biodiversity indices; mathematical models

For citation: Frumin G. T., Shurukhin A. S. Using diversity indices to assess the dynamics of commercial fish populations in Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 97–105. doi: 10.17076/lim2102

### Введение

Актуальность проблемы сохранения и оценки биоразнообразия рассмотрена во многих публикациях [Мэгарран, 1992; Решетников, 2000; Бобылев и др., 2002; Протасов, 2002; Примак, 2002; Шитиков, Розенберг, 2005; Бродский, 2012, 2016; Болотова, 2017; Филатов, Меншуткин, 2017; Захаров, Трофимов, 2019; Шайхутдинова, 2019; Фрумин, 2022]. В водных экосистемах наглядным и практически значимым показателем сокращения биоразнообразия служит изменение видового разнообразия рыбного населения. Известно, что это связано с ухудшением условий обитания и воспроизводства в результате изменения трофического статуса, органического и токсического загрязнения водоемов [Решетников и др., 1982; Терещенко, Стрельников, 1995; Болотова, 1997; Терещенко, 2002а; Терещенко и др., 2004]. Данные негативные процессы охватили и крупнейшие глубоководные озера, к которым

относится Ладожское озеро [Ладожское..., 2000, 2002; Руховец и др., 2006; Особенности..., 2010; Румянцев, Кудерский, 2010; Исследование..., 2011; Ладога..., 2013; Моделирование..., 2016; Современное..., 2021].

Структура уловов, несмотря на селективность промысла, достаточно адекватно отражает динамику рыбного населения и изменение его видового разнообразия, представленного составом уловов и соотношением биомасс разных видов рыб. Сдвиги в структуре рыбного населения характеризуются изменением доминирующего комплекса видов, а также переходом части ценных видов в разряд редких и исчезающих, о чем свидетельствует их занесение в Красную книгу РФ и ее регионов [Красная..., 2018; Леонов, Шурухин, 2024].

Ценная ихтиофауна и важное рыбопромысловое значение Ладожского озера требует соответствующего мониторинга структуры рыбного населения и адекватной оценки изменения видового разнообразия.

Следует отметить, что в исследованиях динамики разнообразия рыбной части сообщества других водоемов на основе многолетних рядов наблюдений рыбопромысловой статистики есть опыт применения индекса биоразнообразия Шеннона [Терещенко и др., 1994, 2004; Терещенко, Стрельников, 1995; Терещенко, 2002б; 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.

Целью данной работы является сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия для оценки динамики видового разнообразия промыслового рыбного населения Ладожского озера.

**Материалы и методы**

Модельным полигоном для исследований динамики рыбного населения послужило Ладожское озеро как крупнейший рыбохозяйственный водоем, имеющий стратегические запасы водных ресурсов [Кудерский и др., 1997; Ладога..., 2013; Поздняков и др., 2021]. Его площадь зеркала достигает 17 872 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 230 м, средняя глубина 46,9 м, объем водной массы 848 км<sup>3</sup> [Ладога..., 2013; Ладожское..., 2015].

Ихтиофауна Ладожского озера насчитывает 43–58 видов круглоротых и рыб [Правдин,

1956; Титенков, 1968; Кудерский, 1996, 2013; Дятлов, 2002].

Однако только немногие виды рыб имеют промысловое значение. В конце XX – первой четверти XXI в. это представители четырех семейств – корюшковые, окуневые, карповые и сиговые (6–7 видов), на долю которых приходится в среднем 95 % всей выловленной в озере рыбы [Леонов, Шурухин, 2024].

Использованная в расчетах информация по динамике и составу уловов основана на официальных данных рыбопромысловой статистики. Статистические данные по вылову водных биологических ресурсов приведены по материалам Северо-Западного территориального управления Росрыболовства.

Анализировался состав промысловых уловов, в котором представлены данные по вылову десяти основных промысловых видов рыб: судак, лещ, щука, налим, окунь, лосось озерный, сиги (все формы вида), ряпушка, корюшка, плотва.

В соответствии со сложившейся традицией анализируемые величины и состав уловов рассматривались как отражение состояния рыбных ресурсов.

Для математико-статистического анализа изменения состава уловов рыб массив первичных данных рыбопромысловой статистики с 1946 по 2023 г. был разделен на пятилетние периоды (табл. 1).

Для количественной оценки изменения разнообразия рыбного населения Ладожского 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] (табл. 2).

Расчет вышеприведенных индексов биоразнообразия (табл. 2) базируется на оценке величин доли вылова каждого вида рыб – p<sub>i</sub>.

Таблица 1. Периодизация статистики рыбодобычи в Ладожском озере

Table 1. Periodization of fishing statistics in Lake Ladoga

| Период<br>Period | Годы<br>Years | Период<br>Period | Годы<br>Years | Период<br>Period | Годы<br>Years |
|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| 1                | 1946–1950     | 6                | 1971–1975     | 11               | 1996–2000     |
| 2                | 1951–1955     | 7                | 1976–1980     | 12               | 2001–2005     |
| 3                | 1956–1960     | 8                | 1981–1985     | 13               | 2006–2010     |
| 4                | 1961–1965     | 9                | 1986–1990     | 14               | 2011–2015     |
| 5                | 1966–1970     | 10               | 1991–1995     | 15               | 2016–2023     |

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

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

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

Результаты и обсуждение

Формирование запасов и уловов рыб Ладожского озера, многолетняя динамика их развития происходят под влиянием главным образом абиотических факторов среды [Антонов, 2007]. В XX–XXI веке динамика уловов в целом имеет вид долгопериодных циклов, отражающих изменения продукционного состояния водоема, что привело к снижению промысловой рыбопродуктивности Ладожского озера и повлияло на величину общего вылова рыбы. Определенные изменения наблюдаются и в видовой структуре уловов [Кудерский, 2013; Леонов, Шурухин, 2024].

Для сравнительного анализа динамики видового разнообразия рыбного населения Ладожского озера проведены расчеты с использованием шести индексов, применяемых в оценке биоразнообразия сообществ экосистем (табл. 3). Для выбора наиболее информативного индекса биоразнообразия, отражающего тренд изменения видового разнообразия рыбного населения Ладожского озера, были построены регрессионные уравнения между индексами и периодами рыбодобычи, а также определены их статистические характеристики (табл. 4). Наиболее пригодное статистически значимое уравнение должно иметь наибольшее

Таблица 3. Показатели изменения разнообразия рыбного населения Ладожского озера, рассчитанные по разным индексам биоразнообразия

Table 3. Indicators of change in the diversity of the fish population of Lake Ladoga, calculated using different biodiversity indices

| Годы<br>Years | Индексы разнообразия<br>Diversity indices |      |      |      |      |       |
|---------------|-------------------------------------------|------|------|------|------|-------|
|               | H                                         | E    | D    | C    | μ    | SH    |
| 1946–1950     | 2,59                                      | 0,78 | 4,69 | 0,21 | 7,37 | 13,33 |
| 1951–1955     | 2,81                                      | 0,85 | 5,46 | 0,18 | 8,19 | 16,61 |
| 1956–1960     | 2,68                                      | 0,81 | 5,06 | 0,20 | 7,66 | 14,59 |
| 1961–1965     | 2,72                                      | 0,82 | 5,50 | 0,18 | 7,65 | 15,18 |
| 1966–1970     | 2,70                                      | 0,81 | 5,43 | 0,18 | 7,61 | 14,88 |
| 1971–1975     | 2,60                                      | 0,78 | 5,03 | 0,20 | 7,30 | 13,46 |
| 1976–1980     | 2,66                                      | 0,80 | 5,36 | 0,19 | 7,34 | 14,30 |
| 1981–1985     | 2,59                                      | 0,82 | 5,11 | 0,20 | 7,08 | 13,33 |
| 1986–1990     | 2,62                                      | 0,83 | 5,27 | 0,19 | 7,23 | 13,74 |
| 1991–1995     | 2,45                                      | 0,77 | 4,39 | 0,23 | 6,63 | 11,59 |
| 1996–2000     | 2,56                                      | 0,81 | 5,12 | 0,20 | 6,78 | 12,94 |
| 2001–2005     | 2,44                                      | 0,77 | 4,37 | 0,23 | 6,58 | 11,47 |
| 2006–2010     | 2,32                                      | 0,70 | 3,89 | 0,26 | 6,43 | 10,18 |
| 2011–2015     | 2,27                                      | 0,68 | 3,66 | 0,27 | 6,29 | 9,68  |
| 2016–2023     | 2,61                                      | 0,75 | 4,47 | 0,22 | 7,80 | 13,60 |

значение  $F_p$ , наибольший коэффициент корреляции  $r$  и наименьшую стандартную ошибку  $\sigma$ . 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].

Как следует из приведенных в табл. 4 статистических показателей, все регрессионные уравнения адекватны ( $F_p > F_T$ ), но не могут быть использованы для прогнозирования ( $F_p/F_T < 4$ ).

Наиболее информативными индексами для оценки динамики разнообразия рыбного населения Ладожского озера являются индекс Шеннона ( $r = 0,73$ ;  $F_p/F_T = 3,3$ ) и индекс Шелдона ( $r = 0,74$ ;  $F_p/F_T = 3,4$ ) (рис.).

Чем выше значения индекса Шеннона и индекса Шелдона, тем выше уровень видового разнообразия. Индекс Шелдона наиболее чувствителен к изменению вклада видов. Линия регрессии на рисунке свидетельствует об отрицательном тренде индекса Шелдона за рассматриваемый период и, соответственно, о снижении разнообразия рыбного населения Ладожского озера.

Информативность индекса биоразнообразия Шелдона связана с возможностью оценки зависимости разнообразия рыбного населения Ладожского озера от естественных и антропогенных факторов (эвтрофирование, интродукция рыб, токсическое и тепловое загрязнение).

Парные корреляции индексов разнообразия рыбного населения в Ладожском озере представлены в табл. 5.

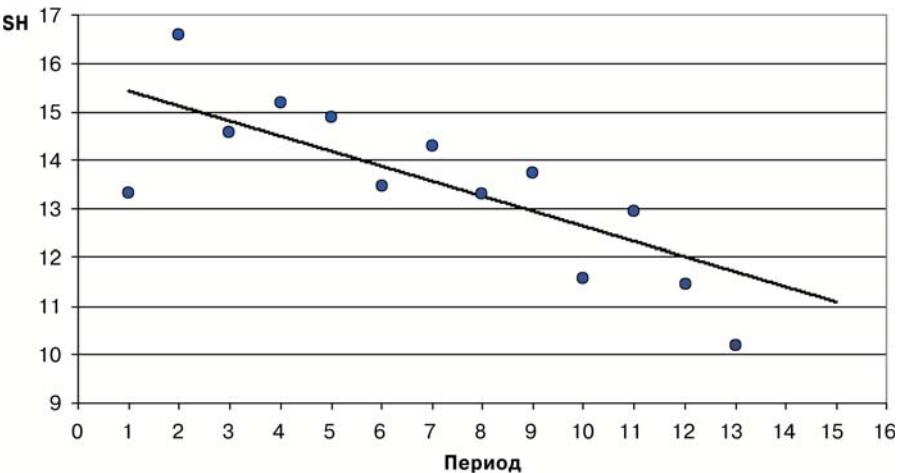
Таблица 4. Регрессионные уравнения и статистические характеристики индексов биоразнообразия, отражающие изменения разнообразия рыбного населения Ладожского озера

Table 4. Regression equations and statistical characteristics of biodiversity indices reflecting changes in the diversity of the fish population of Lake Ladoga

| Регрессионные уравнения<br>Regression equations | Статистические показатели<br>Statistical characteristics |          |      |       |           |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------|------|-------|-----------|
|                                                 | n                                                        | $\sigma$ | r    | $F_p$ | $F_p/F_T$ |
| $H = 2,77 - 0,024 \cdot \text{период/period}$   | 15                                                       | 0,10     | 0,73 | 15,0  | 3,3       |
| $E = 0,84 - 0,0067 \cdot \text{период/period}$  | 15                                                       | 0,04     | 0,66 | 10,2  | 2,2       |
| $C = 0,17 + 0,0044 \cdot \text{период/period}$  | 15                                                       | 0,02     | 0,70 | 12,8  | 2,8       |
| $D = 5,57 - 0,089 \cdot \text{период/period}$   | 15                                                       | 0,44     | 0,69 | 11,6  | 2,5       |
| $\mu = 7,85 - 0,081 \cdot \text{период/period}$ | 15                                                       | 0,43     | 0,66 | 9,8   | 2,1       |
| $SH = 15,74 - 0,31 \cdot \text{период/period}$  | 15                                                       | 1,31     | 0,74 | 15,6  | 3,4       |

Примечание. n – число наблюдений, r – коэффициент корреляции,  $\sigma$  – 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,  $\sigma$  – standard error,  $F_p$  – calculated value of Fisher's test,  $F_T$  – tabulated value of Fisher's test at a significance level of 95 %.



Динамика индекса разнообразия Шелдона (SH) рыбного населения Ладожского озера

Dynamics of the Sheldon diversity index (SH) of the fish population of Lake Ladoga

Согласно шкале Чеддока теснота связи между индексом Шелдона (SH) и индексом Пие-лу (Е) характеризуется как «высокая», а между индексом Шелдона и другими индексами –

как «весьма высокая» [Макарова, Трофимец, 2002]. Оценка парной корреляции между индексами разнообразия позволяет выбрать наиболее репрезентативный из них.

Таблица 5. Матрица парных корреляций индексов биоразнообразия промысловых рыб в Ладожском озере  
Table 5. Matrix of paired correlations of biodiversity indices of commercial fish in Lake Ladoga

| Индекс<br>Index | H     | E    | C    | D    | μ    | SH    |
|-----------------|-------|------|------|------|------|-------|
| H               | 1     | 0,89 | 0,95 | 0,92 | 0,93 | 0,996 |
| E               | 0,89  | 1    | 0,95 | 0,94 | 0,69 | 0,87  |
| C               | 0,95  | 0,95 | 1    | 0,99 | 0,79 | 0,94  |
| D               | 0,92  | 0,94 | 0,99 | 1    | 0,73 | 0,91  |
| μ               | 0,93  | 0,69 | 0,79 | 0,73 | 1    | 0,94  |
| SH              | 0,996 | 0,87 | 0,94 | 0,91 | 0,94 | 1     |

## Заключение

Впервые для Ладожского озера проведена оценка динамики разнообразия рыбного населения по многолетним рядам рыбопромысловой статистики более чем за 75-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 Ладожском озере являются индексы Шеннона и Шелдона.

## Литература

Антонов А. Е. Природная циклоэнергетика. Гидрометеорология и рыбопромысловое прогнозирование. СПб.: Гидрометеоиздат, 2007. 216 с.

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. Биологическое разнообразие и проблемы его сохранения // Наука – школе: Сб. науч. статей. Вып. VI. СПб.: Арт-Экспресс, 2017. С. 119–174.

Болотова Н. Л. Проблемы сохранения исчезающих популяций рыб в водоемах Вологодской области // Мониторинг биоразнообразия. М.: Наука, 1997. С. 36–45.

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 государственный университет. 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.

Бродский А. К. Ускользающая реальность: Биоразнообразие: его роль в поддержании жизни на Земле, закономерности формирования и разрушения. СПб.: ДЕАН, 2012. 172 с.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

Дятлов М. А. Рыбы Ладожского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. С. 39–45.

Захаров В. М., Трофимов И. Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2019. 160 с.

Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А., Голосов С. Д., Ибраев Р. А. Моделирование гидротермодинамики Ладожского озера // Всерос. конф. по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум). СПб.: Лема, 2016. С. 41–49.

Красная книга Ленинградской области: Животные / Гл. ред. Ю. Н. Бубличенко, С. М. Голубков, П. В. Кияшко. СПб.: Папирус, 2018. 560 с.

Кудерский Л. А. Состояние рыбного населения Ладожского озера в 1946–2005 гг. в связи с природными и антропогенными факторами // Исследования по ихтиологии, рыбному хозяйству и смежным дисциплинам. СПб.-М.: КМК, 2013. С. 264–288.

Кудерский Л. А. Состояние рыбных ресурсов Ладожского озера, р. Нева и восточной части Финского залива // Экологическое состояние водоемов и водотоков бассейна реки Невы. СПб.: СПбНЦ РАН, 1996. С. 131–154.

Кудерский Л. А., Печников А. С., Шимановская Л. Н. Рыбные ресурсы Ладожского и Онежского озер. М.: ВНИЭРХ, 1997. 40 с.

- Кудерский Л. А. Управление формированием рыбных ресурсов и их использованием (на примере Ладожского озера) // *Aquaterra*: Сб. матер. конф. СПб., 2004. С. 191–193.
- Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб., 2013. 560 с.
- Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
- Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. 488 с.
- Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Драбковой. СПб.: Наука, 2002. 326 с.
- Леонов А. Г., Шурухин А. С. Состояние рыбных запасов и промысла основных промысловых видов рыб Ладожского озера в XXI веке // *Вопросы рыболовства*. 2024. Т. 25(3). С. 55–76. doi: 10.36038/0234-2774-2024-25-3-55-76
- Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
- Малько С. В. Биоразнообразие. Конспект лекций. 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.
- Петрова Н. А., Петрова Т. Н., Сусарева О. М., Иофина И. В. Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37, № 5. С. 580–590.
- Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А., Расулова А. М., Коробченкова К. Д. Ладожское озеро – геостратегический водный объект Северо-Запада России и его зоны экологического риска // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 62. С. 139–161. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161
- Правдин И. Ф. Видовой состав ихтиофауны Ладожского озера и Приладожья // *Известия ВНИОРХ*. 1956. Т. 38. С. 12–30.
- Примаков Р. Основы сохранения биоразнообразия / Пер. с англ. О. С. Якименко, О. А. Зиновьевой. М.: НУМЦ, 2002. 256 с.
- Протасов А. А. Биоразнообразие и его оценка. Концептуальная диверсикология. Киев, 2002. 105 с.
- Решетников Ю. С., Попова О. А., Стерлигова О. Н., Шатуновский М. И. Изменение рыбного населения эвтрофируемого водоема. 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.
- Румянцев В. А., Кудерский Л. А. Ладожское озеро: общая характеристика, экологическое состояние // *Общество. Среда. Развитие (Terra Humana)*. 2010. № 1. С. 171–182.
- Руховец Л. А., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Петрова Н. А., Полосков В. Н. Оценка возможных изменений в экосистеме Ладожского озера в 21 веке под влиянием антропогенных и климатических факторов // *Водные ресурсы*. 2006. Т. 33, № 3. С. 367–382.
- Руховец Л. А., Петрова Н. А., Меншуткин В. В., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полосков В. Н., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки // *Водные ресурсы*. 2011. Т. 38, № 6. С. 740–752.
- Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев и др. М.: РАН, 2021. 637 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- 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, 2002а. С. 154–173.
- 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, 2002б. С. 143–153.
- Терещенко В. Г., Стерлигова О. П., Павлов В. Т., Ильмаст Н. В. Многолетняя динамика структурных и системных характеристик рыбного населения эвтрофируемого Сямозера // *Биология внутренних вод*. 2004. № 3. С. 93–102.
- 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.
- Титенков И. С. Рыбы и рыбный промысел Ладожского озера // *Биологические ресурсы Ладожского озера*. Зоология. Л., 1968. С. 130–173.
- Филатов Н. Н., Меншуткин В. В. Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных водоемов под влиянием климата и антропогенных факторов // *Ученые записки РГГУ*. 2017. № 48. С. 120–147.
- 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 гидробиологии*. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 91–129.

## References

- Antonov A. E. Natural cycloenergetics. Hydrometeorology and fishery forecasting. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 2007. 216 p. (In Russ.)
- 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 Nature Management Economics. Moscow; 2002. 604 p. (In Russ.)
- Bolotova N. L. Biological diversity and problems of its conservation. *Nauka – shkole: Sb. nauch. statei = Science for School: Proceed. Iss. VI*. St. Petersburg: Art-Express; 2017. P. 119–174. (In Russ.)
- Bolotova N. L. Problems of conservation of endangered fish populations in water bodies of the Vologda Region. *Monitoring bioraznobraziya = Monitoring of Biodiversity*. Moscow: Nauka; 1997. P. 36–45. (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: Proceed. V int. sci. conf. (Minsk – Naroch, Sept. 12-17, 2016)*. Minsk-Naroch; 2016. P. 283–284. (In Russ.)
- Brodskii A. K. Biodiversity: structure, problems, and prospects of conservation. *Aspekty bioraznobraziya: Sb. trudov Zoologicheskogo muzeya MGU im. M. V. Lomonosova = Aspects of biodiversity: Proceed. of the Zoological Museum of Lomonosov Moscow State University*. Vol. 54(1). Moscow: KMK; 2016. P. 380–396. (In Russ.)
- Brodskii A. K. Elusive reality. Biodiversity: its role in sustaining life on Earth, patterns of formation and destruction. St. Petersburg: DEAN; 2012. 172 p. (In Russ.)
- Bublichenko Yu. N., Golubkov S. M., Kiyashko P. V. (eds.). The Red Data Book of the Leningrad Region: Animals. St. Petersburg: Papirus; 2018. 560 p. (In Russ.)
- Draper N., Smith G. Applied regression analysis. Moscow: Finance and Statistics; 1986. 366 p. (In Russ.)
- Dyatlov M. A. Fishes of Lake Ladoga. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2002. P. 39–45. (In Russ.)
- Filatov N. N. (ed.). Lake Ladoga. Monitoring, research of the current state and problems of management of Lake Ladoga and other large lakes. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. 488 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Menshutkin V. V. Problems of assessing changes in ecosystems of large stratified reservoirs under the influence of climate and anthropogenic factors. *Uchenye zapiski RGGU = Proceed. of the Russian State Hydrometeorological University*. 2017;48: 120–147. (In Russ.)
- Frumin G. T. Dynamics of the ecological state of Lake Ladoga. *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry*. 2022;31(5):253–257. (In Russ.)
- Kuderskii L. A. Management of the formation of fish resources and their use (on the example of Lake Ladoga). *Aquaterra: Sb. mater. konf. = Aquaterra: Proceed. of the conference*. St. Petersburg; 2004. P. 191–193. (In Russ.)
- Kuderskii L. A. State of fish resources of Lake Ladoga, the Neva River and the eastern part of the Gulf of Finland. *Ecologicheskoe sostoyanie vodoyomov i vodotokov basseina reki Nevy = Ecological state of water bodies and watercourses of the Neva River basin*. St. Petersburg: SPbNTs RAN; 1996. P. 131–154. (In Russ.)
- Kuderskii L. A. The state of the fish population of Lake Ladoga in 1946–2005 in connection with natural and anthropogenic factors. *Issledovaniya po ikhtiologii, rybnomu khozyaystvu i smezhnym distsiplinam = Research in ichthyology, fisheries and related disciplines*. St. Petersburg-Moscow: KMK; 2013. P. 264–288. (In Russ.)
- Kuderskii L. A., Pechnikov A. S., Shimanovskaya L. N. Fish resources of Lakes Ladoga and Onega. Moscow: VNIERKh; 1997. 40 p. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A. et al. (eds.). Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate: a monograph. Moscow: RAN; 2021. 637 p. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- Leonov A. G., Shurukhin A. S. Status of the fish stocks and fisheries of the main commercial fish species of Lake Ladoga in the XXI century. *Problems of Fisheries*. 2024;25(3):55–76. (In Russ.). doi: 10.36038/0234-2774-2024-25-3-55-76
- Magarran E. Ecological diversity and its measurement. Moscow: Mir; 1992. 181 p. (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; 2020. 41 p. (In Russ.)
- Pesenko Yu. A. Principles and methods of quantitative analysis in faunistic studies. Moscow: Nauka; 1982. 288 p. (In Russ.)
- Petrova N. A., Petrova T. N., Susareva O. M., Iofina I. V. Features of the evolution of the Lake Ladoga ecosystem under the influence of anthropogenic eutrophication. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(5):580–590. (In Russ.)
- Pozdnyakov Sh. R., Kondrat'ev S. A., Rasulova A. M., Korobchenkova K. D. Lake Ladoga – a geostrategic water body of the North-West of Russia and its zones of environmental risk. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021;62:139–161. (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161
- Pravdin I. F. Species composition of the ichthyofauna of Lake Ladoga and the Ladoga region. *Izvestiya VNIORKh*. 1956;38:12–30. (In Russ.)
- Primak R. Fundamentals of biodiversity conservation. 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. N., Shatunovskii M. I. Changes in 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 raznobraziya fauny, flory i osnovnykh ekosistem Evrazii = Study and protection of diversity of fauna, flora and main ecosystems of Eurasia*. Moscow: IPEE RAN; 2000. P. 264–270. (In Russ.)

Rukhovets L. A., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Petrova N. A., Poloskov V. N. Assessment of possible changes in the ecosystem of Lake Ladoga in the 21<sup>st</sup> century under the influence of anthropogenic and climatic factors. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(3):367–382. (In Russ.)

Rukhovets L. A., Petrova N. A., Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Poloskov V. N., Petrova T. N., Susareva O. M. Study of the response of the Ladoga Lake ecosystem to a decrease in phosphorus load. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2011;38(6):740–752. (In Russ.)

Rumyantsev V. A. (ed.). Lake Ladoga and the sights of its coast. Atlas. St. Petersburg: Nestor-History; 2015. 200 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G. (eds.). Lake Ladoga – past, present, future. St. Petersburg: Nauka, 2002. 326 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A. (eds.). Ladoga. St. Petersburg: INOZ RAS; 2013. 560 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kuderskii L. A. Lake Ladoga: general characteristics, ecological state. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana) = Society. Environment. Development (Terra Humana)*. 2010;1:171–182. (In Russ.)

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

Shitikov V. K., Rosenberg G. S. Biodiversity assessment: an attempt at formal generalization. *Kolichestvennye metody ekologii gidrobiologii = Quantitative methods of ecology of hydrobiology*. Tolyatti: SamNTs RAN; 2005. P. 91–129. (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; 2002. P. 154–173. (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; 2002. P. 143–153. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Sterligova O. P., Pavlov V. T., Il'mast N. V. Long-term dynamics of structural and systemic characteristics of the fish population of eutrophicated Syamozero. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2004;3:93–102. (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 ikhtiologii = Journal of Ichthyology*. 1995;35(1):71–77. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Tereshchenko L. I., Smetnin M. M. Evaluation of various indices for expressing the biological diversity of a community. *Bioraznoobrazie: Stepen' taksonomicheskoi izuchennosti = Biodiversity: The degree of taxonomic study*. Moscow; 1994. P. 86–97. (In Russ.)

Titenkov I. S. Fishes and fisheries of Lake Ladoga. *Biologicheskie resursy Ladozhskogo ozera. Zoologiya = Biological resources of Lake Ladoga. Zoology*. Leningrad; 1968. P. 130–173. (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.)

Zverev I. S., Ushakov K. V., Shipunova E. A., Golosov S. D., Ibraev R. A. Modeling of hydrothermodynamics of Lake Ladoga. *Vseros. konf. po krupnym vnutrennim vodoemam (V Ladozhskii simpozium) = All-Russian conf. on large inland water bodies (V Ladoga symposium)*. St. Petersburg: Lema; 2016. P. 41–49. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 12.05.2025; принята к публикации / accepted: 18.09.2025.  
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  
e-mail: gfrumin@mail.ru

**Шурухин Александр Степанович**

канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник  
e-mail: prognozfish@rambler.ru

## CONTRIBUTORS:

**Frumin, Grigory**

Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher

**Shurukhin, Alexander**

Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher

УДК 574.583(282.247.211)

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИТОКА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА, ПРОТЕКАЮЩЕГО ПО УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ, ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА

**Е. М. Макарова**

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

В 2015 г. изучали бактериопланктон р. Неглинка – притока Онежского озера, дренирующего территорию г. Петрозаводска. В реку впадают без очистки 10 ливневых стоков, составляющие треть от общего объема стока самой реки. На урбанизированной территории в речных водах вдоль по течению отмечается увеличение численности эколого-трофических групп бактериопланктона и условно патогенных микроорганизмов. Отмечено, что количественные показатели бактериопланктона характеризовались значимыми различиями на загородном и городском участках реки. Показано, что сезонная динамика изученных показателей бактериопланктона слабо связана с гидрологическим и температурным режимом реки и отражает влияние стока загрязняющих веществ с городской территории. Высокое количество индикаторных групп бактериопланктона (гетеротрофных, сапрофитных, фенолоокисляющих и углеводородокисляющих бактерий, общих колиформных бактерий) свидетельствовало о сильном загрязнении речных вод различными органическими веществами, в том числе и фекального происхождения, а также нефтяными углеводородами и фенольными соединениями.

Ключевые слова: Республика Карелия; Петрозаводск; река Неглинка; биоиндикация; загрязнение; качество воды

Для цитирования: Макарова Е. М. Оценка экологического состояния притока Онежского озера, протекающего по урбанизированной территории, по показателям бактериопланктона // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 106–118. doi: 10.17076/lim2129

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (№ 121021700117-3 «Диагноз состояния и долгосрочный прогноз изменений экосистем крупнейших озер-водохранилищ Севера ЕЧР (Онежского и Выгозера), входящих в систему Беломоро-Балтийского водного пути»).

## **E. M. Makarova. ASSESSING THE ECOLOGICAL STATE OF A LAKE ONEGO TRIBUTARY FLOWING THROUGH URBANIZED TERRITORY USING BACTERIOPLANKTON INDICATORS**

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

In 2015, the bacterioplankton of the Neglinka River, a tributary to Lake Onego draining the territory of Petrozavodsk, was studied. Ten storm drains empty into the river without treatment, making up a third of the river's total streamflow. As the river flows through the urban area, the number of ecological and trophic groups of bacterioplankton and pathogenic microorganisms in the water increases. The quantitative indicators of bacterioplankton featured significant differences between the suburban and urban parts of the river. The seasonal patterns of the studied bacterioplankton indicators are shown to have little correlation with the hydrological and temperature regime of the river, reflecting the influence of polluted runoff from the urban area. The high number of indicator groups of bacterioplankton (heterotrophic, saprophytic, phenol-oxidizing and hydrocarbon-oxidizing bacteria, total coliform bacteria) points to severe pollution of the river water with various organic substances, including those of fecal origin, as well as petroleum hydrocarbons and phenolic compounds.

**Keywords:** Republic of Karelia; Petrozavodsk; Neglinka River; bioindication; pollution; water quality

**For citation:** Makarova E. M. Assessing the ecological state of a Lake Onego tributary flowing through urbanized territory using bacterioplankton indicators. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 106–118. doi: 10.17076/lim2129

**Funding.** The study was carried out under state assignment to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (No. 121021700117-3 “Diagnosis of the current state and long-term forecast of changes in the ecosystems of the largest impounded lakes of northern European Russia (Onego and Vygozero) within in the White Sea-Baltic Waterway system”).

### **Введение**

В связи с ростом урбанизации увеличивается и антропогенная нагрузка на водотоки, протекающие по территории городов [Решетняк, 2018; Румянцев и др., 2021]. Показатель урбанизации в Республике Карелия – почти 80 % [Государственный..., 2017–2023]. Главный город республики Петрозаводск стремительно расширяется: идут новые застройки территорий, строительство новых дорожных сетей, что непосредственно влияет на городскую среду и водные объекты города.

Река Неглинка, протекая по территории г. Петрозаводска, принимает 10 ливневых стоков [Макарова, Калинкина, 2024], поступающих без очистки с городской территории, и впадает в Петрозаводскую губу Онежского озера – источник централизованного водоснабжения. Берега реки представляют рекреационную ценность и активно используются населением в качестве места для отдыха и выгула домашних животных. В настоящее время р. Неглинке присвоена высшая категория рыбохозяйст-

венного значения. В основном река заселена малоценными породами рыб, наибольшее видовое разнообразие отмечается в устьевом участке, куда заходят рыбы из Онежского озера [Тыркин и др., 2011; Лукина, Беличева, 2013].

В результате высокой заболоченности водосборов речные воды характеризуются повышенным содержанием гумусовых веществ, что обуславливает высокую цветность вод и, как следствие их комплексобразующей способности, – высокое содержание железа. Природные региональные особенности химического состава воды р. Неглинки (высокие цветность и содержание железа, пониженные значения pH и др.) могут усложнить задачу оценки ее качества. Для более точной оценки последствий влияния на реку человеческой деятельности необходимо рассматривать действие всего спектра факторов – природных (заболоченная водосборная территория) и антропогенных (влияние ливневых вод), а также возможных эффектов их взаимодействия. Ранее было показано [Макарова и др., 2023], что бактериопланктон –

надежный индикатор антропогенного загрязнения высокоцветных вод. Это обуславливает применимость микробиологических показателей в целях оценки качества воды водоемов и водотоков, испытывающих влияние заболоченных водосборов.

Цель данного исследования – проанализировать пространственно-временное распределение бактериопланктона в р. Неглинке и оценить экологическое состояние водотока по микробиологическим показателям.

Материалы и методы

Река Неглинка – небольшой приток Онежского озера, в нижнем течении протекающий по территории г. Петрозаводска. Скорость течения 0,3–0,5 м/с. Площадь водосборной территории составляет 46,1 км², заболоченность – 13 %, озерность – менее 1 % [Ресурсы..., 1972; Балаганский и др., 2015]. По величине уклона р. Неглинка близка к рекам полугорного типа (8,9 ‰) [Ресурсы..., 1972]. Тип питания реки смешанный. Поверхностное питание осуществляется за счет таяния снегов и выпадения дождевых осадков, подземное – родниками [Бородулина, 2013].

По ионному составу вода р. Неглинки относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу, однако в течение летне-осеннего периода меняет группу с кальциевой на натриевую.

Содержание в воде органического углерода достигает 22,5 мг/л [Сабылина, Ефремова, 2017].

Химический состав воды р. Неглинки обусловлен влиянием заболоченной водосборной территории в верхнем течении реки и поступлением подземных вод в среднем ее течении [Бородулина, 2013], что выражается изменением величин pH, цветности и минерализации [Andronikov et al., 2019]. Общая минерализация воды в Неглинке изменяется от верхнего участка реки к нижнему: от 35 до 400 мг/л [Бородулина, 2013]. Также в черте города на химический состав речных вод влияет поступление ливневых стоков, обуславливающих сильное загрязнение реки взвешенными веществами (4–120 мг/л), легкоминерализуемым органическим веществом, определяемым по БПК<sub>5</sub> (1,1–6,4 мг O<sub>2</sub>/л), и нефтепродуктами (до 0,34 мг/л) [Макарова, Калинкина, 2024].

По данным [Макарова, Калинкина, 2024], в 2015 г. для р. Неглинки были отмечены статистически значимые различия значений между загородным и городским участками реки по показателям pH, цветности, насыщению воды кислородом (O<sub>2</sub>), бихроматной окисляемости (ХПК), биологическому потреблению кислорода (БПК<sub>5</sub>) и минеральному фосфору (P<sub>мин</sub>). На загородном участке реки медианные значения O<sub>2</sub>, БПК<sub>5</sub>, P<sub>мин</sub> были значимо ниже, чем на городском, а показатели цветности и ХПК – значимо выше (табл. 1).

Таблица 1. Химические показатели природного состава и антропогенной загрязненности воды р. Неглинки в период открытой воды в 2015 г. [Макарова и др., 2023; Макарова, Калинкина, 2024]

Table 1. Chemical indicators of the natural composition and anthropogenic pollution of the Neglinka River water during the open water period in 2015 [Makarova et al., 2023; Makarova, Kalinkina, 2024]

| Показатель<br>Indicator                                             | Загородный участок<br>Suburban section | Городской участок<br>Urban section |                                    |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                                                                     | Станции<br>Stations                    |                                    |                                    |
|                                                                     | N-1                                    | N-2                                | N-3                                |
| pH                                                                  | <u>4,3–5,2</u><br>4,5 ± 0,3            | <u>6,5–7,7</u><br>7,0 ± 0,3        | <u>6,6–7,8</u><br>7,4 ± 0,3        |
| Цветность, град.<br>Color, degrees                                  | <u>270–384</u><br>359 ± 32             | <u>34–283</u><br>146 ± 36          | <u>64–285</u><br>104 ± 35          |
| O <sub>2</sub> , мг/л<br>O <sub>2</sub> , mg/l                      | <u>7,63–10,35</u><br>8,38 ± 0,50       | <u>5,63–11,17</u><br>7,56 ± 1,11   | <u>8,72–11,5</u><br>9,56 ± 0,08    |
| Насыщение воды O <sub>2</sub> , %<br>% of O <sub>2</sub> saturation | <u>62–73</u><br>69 ± 1                 | <u>51–81</u><br>65 ± 7             | <u>78–92</u><br>81 ± 2             |
| ХПК, мг O/л<br>COD, mg O/l                                          | <u>33,74–47,16</u><br>37,96 ± 3,62     | <u>20,32–46,78</u><br>25,30 ± 3,33 | <u>12,52–40,39</u><br>20,83 ± 4,58 |
| Fe <sub>общ</sub> , мг/л<br>Fe <sub>tot</sub> , mg/l                | <u>1,22–5,09</u><br>2,36               | <u>1,11–4,04</u><br>2,06           | <u>0,67–2,83</u><br>1,29           |

Окончание табл. 1  
Table 1 (continued)

| Показатель<br>Indicator                                                            | Загородный участок<br>Suburban section | Городской участок<br>Urban section |                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|                                                                                    | Станции<br>Stations                    |                                    |                                 |
|                                                                                    | N-1                                    | N-2                                | N-3                             |
| БПК <sub>5</sub> , мг O <sub>2</sub> /л<br>BOD <sub>5</sub> , mg O <sub>2</sub> /l | <u>0,88–1,9</u><br>1,12 ± 0,15         | <u>1,09–6,4</u><br>4,32 ± 1,53     | <u>2,04–5,27</u><br>2,55 ± 0,10 |
| Взвешенные вещества, мг/л<br>Suspended matter, mg/l                                | <u>9,0–92,0</u><br>23,5 ± 6,2          | <u>6,5–97,0</u><br>14,5 ± 3,2      | <u>4,5–120,0</u><br>16,3 ± 4,9  |
| P <sub>общ</sub> <sup>1</sup> , мкг Р/л<br>TP, mcg/l                               | <u>42–188</u><br>85 ± 35               | <u>48–339</u><br>123 ± 48          | <u>22–319</u><br>203 ± 75       |
| P <sub>мин</sub> <sup>1</sup> , мкг Р/л<br>P-PO <sub>4</sub> <sup>1</sup> , mcg/l  | <u>4–31</u><br>19                      | <u>39–273</u><br>140               | <u>117–209</u><br>157           |
| Нефтепродукты, мг/л<br>Oils, mg/l                                                  | < 0,02–0,05                            | < 0,02–0,34                        | < 0,02–0,05                     |

Примечание. Здесь и в табл. 2: над чертой — диапазон значений, под чертой — медиана и ее ошибка.

Note. Here and in Table 2: the range of values is given above the line, the median and its error – below the line.

Отбор проб воды на микробиологический анализ производился в поверхностном слое воды в медиальной части реки в период с апреля по ноябрь 2015 г. на трех станциях р. Неглинка: N-1 – за пределами городской черты с замедленным течением, N-2 и N-3 – на городской территории с быстрым течением. Дополнительно в августе 2015 г. выполнен разовый отбор проб в Петрозаводской губе Онежского озера в поверхностном горизонте на ст. P22 (глубина 18,7 м) на расстоянии 500 м от устья р. Неглинка (рис. 1).

Расход воды р. Неглинка в разные месяцы 2015 г. изменялся в пределах 0,2–1,25 м³/с (среднегодовой расход – 0,43 м³/с) [Автоматизированная...]. Температура воды за время исследования варьировала в пределах 1–13 °С (рис. 2).

Общая численность бактерий (ОЧБ) определялась методом прямого счета с использованием красителя акридинового оранжевого [Kemp et al., 1993]. Сапрофитные бактерии (СБ) выращивали на рыбо-пептонном агаре (РПА) при 22 °С, гетеротрофные бактерии (ГБ) – на РПА:10, фенолоксиляющие (ФОБ) – на минеральной среде с добавлением фенола, углеводород-окисляющие (УОБ) – на среде Диановой – Ворошиловой с добавлением очищенного агара Дифко, мазута и эмульгатора ТВИН-80 [Кузнецов, Дубинина, 1989], общее микробное число (ОМЧ) – на РПА при 37 °С в течение 24 ч. Для определения общих колиформных бактерий (ОКБ) проба воды фильтровалась через мембранные фильтры ( $D_{пор} = 0,45$  мкм), колонии выращивали на фильтрах, помещенных на агаризованную среду Эндо, при 37 °С в течение 24 ч.

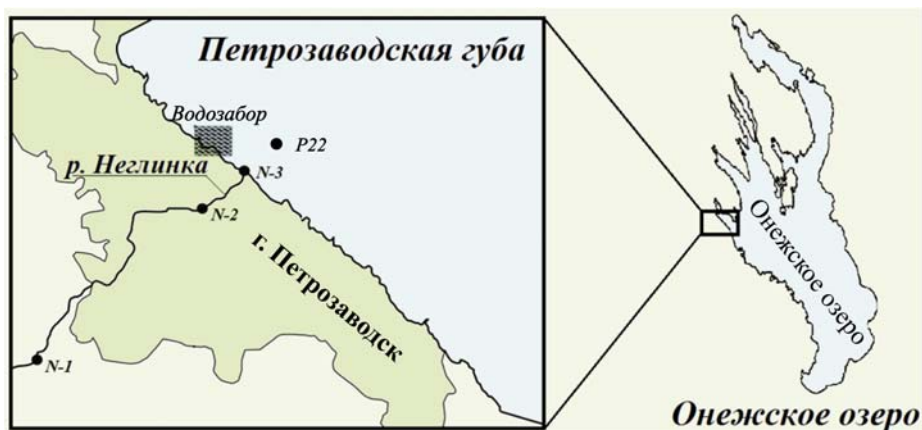


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб на р. Неглинке

Fig. 1. Schematic map of the sampling stations on the Neglinka River

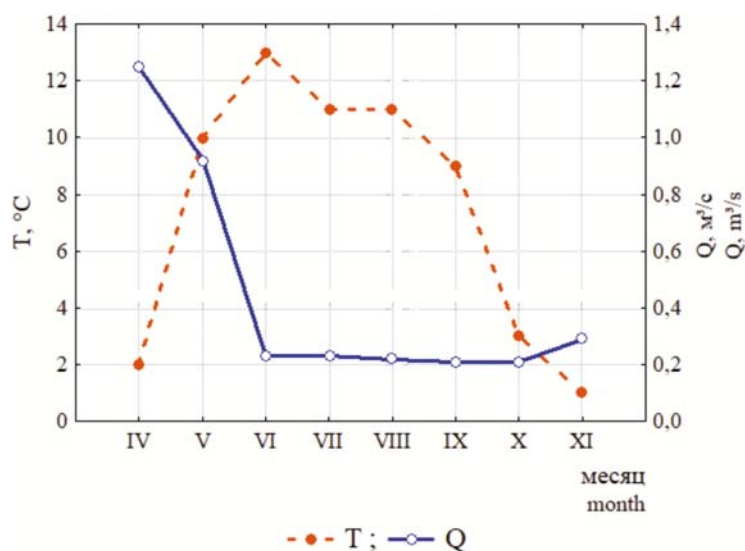


Рис. 2. Температура (Т, °С) и расход воды (Q, м³/с) в р. Неглинке в даты отбора проб в 2015 г.

Fig. 2. Water temperature (Т, °С) and water discharge (Q, м³/s) in the Neglinka River on sampling dates in 2015

После инкубации выполнялся цитохромокси- дантный тест [МУК 4.2.1884-04].

Класс качества воды определяли в соответ- ствии с комплексной экологической класси- фикацией качества поверхностных вод суши по показателям ОЧБ, СБ и ОКБ [Оксиюк и др., 1993]. Об интенсивности протекания процес- сов самоочищения судили по коэффициенту самоочищения ( $K_c$ ) – соотношению СБ/ОМЧ [МУК 4.2.1884-04]. Степень загрязненности воды оценивали согласно шкале В. И. Романен- ко [1985] по соотношению СБ/ОЧБ, %. Степень загрязненности речной воды нефтяными и фе- нольными соединениями оценивали согласно классификации качества пресных вод по разви- тию ФОБ и УОБ [Виноградов и др., 2001].

Для корректной оценки качества воды по показателям ОЧБ в соответствии со шкалой В. И. Романенко [1985] и классификацией, пред- ложенной О. П. Оксиюк с соавторами [1993], использовали ранее полученный коэффициент пересчета на эпифлуоресцентный метод 2,06 с метода световой микроскопии с окрашиванием клеток эритрозином [Макарова и др., 2022].

При статистической обработке данных рас- считывали медианное значение выборки и его ошибку, применяли непараметрические методы статистики (коэффициент корреляции Спирме- на, U-критерий Манна – Уитни) и метод главных компонент. Для приведения исходных данных к одним единицам измерения и представления на одном рисунке данные были стандартизи- рованы. Их преобразовывали путем вычитания

каждого значения выборки из среднего ариф- метического и деления разности на стандартное отклонение. При выявлении различий между вы- борками и оценке корреляции был принят уро- вень значимости 0,05. Статистическая обработ- ка данных осуществлялась в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru.

## Результаты и обсуждение

Пространственное распределение бактерио- планктона в р. Неглинке характеризуется мини- мальными показателями численности бактерий на загородном участке реки. В середине тече- ния отмечались максимальные количественные показатели, которые затем снижались к устью реки (табл. 2). Значимость различий всех изу- ченных эколого-трофических групп бактерио- планктона загородного и городских участков р. Неглинки подтверждалась непараметриче- ским критерием Манна – Уитни.

Схожая динамика пространственного рас- пределения бактериопланктона была получена ранее – в летние периоды 2011–2012 гг., когда высокая численность бактерий снижалась от ст. N-2 к ст. N-3 [Теканова и др., 2015].

Анализ данных с помощью метода главных компонент показал, что различные участки р. Неглинки характеризуются разным уровнем развития бактериопланктона. На первую глав- ную компоненту (ГК1) приходится 84 %, на вто- рую (ГК2) – 6 % всей вариации, что вместе объ- ясняет 90 % вариации всех данных (табл. 3).

Таблица 2. Бактериопланктон р. Неглинки в период открытой воды в 2015 г.

Table 2. Bacterioplankton of the Neglinka River during the period of open water in 2015

| Показатель<br>Indicator                                                                                                  | Загородный участок<br>Suburban section | Городской участок<br>Urban section   |                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
|                                                                                                                          | Станции<br>Stations                    |                                      |                                   |
|                                                                                                                          | N-1                                    | N-2                                  | N-3                               |
| Общая численность бактерий (ОЧБ), *10 <sup>6</sup> кл/мл<br>Total abundance of bacteria (TAB), *10 <sup>6</sup> cells/ml | <u>0.42–2.54</u><br>1,46 ± 0,29        | <u>2.46–7.46</u><br>3,49 ± 0,72      | <u>1.57–5.84</u><br>3,33 ± 0,68   |
| Сапрофитные бактерии (СБ), *10 <sup>3</sup> КОЕ/мл<br>Saprophytic bacteria (SB), *10 <sup>3</sup> CFU/ml                 | <u>0.10–2.23</u><br>0,77 ± 0,18        | <u>3.00–196.20</u><br>20,40 ± 7,02   | <u>1.00–41.00</u><br>5,05 ± 1,71  |
| Гетеротрофные бактерии, *10 <sup>3</sup> КОЕ/мл<br>Heterotrophic bacteria, *10 <sup>3</sup> CFU/ml                       | <u>0.6–4.6</u><br>1,2 ± 0,2            | <u>12.0–429.0</u><br>67,8 ± 24,6     | <u>8.9–92.0</u><br>14,8 ± 3,0     |
| Фенолоксиляющие бактерии, *10 <sup>3</sup> КОЕ/мл<br>Phenol-oxidizing bacteria, *10 <sup>3</sup> CFU/ml                  | <u>0.10–2.00</u><br>0,44 ± 0,19        | <u>8.5–88.0</u><br>19,85 ± 8,06      | <u>0.44–26.0</u><br>3,45 ± 2,1    |
| Углеводородоксиляющие бактерии, *10 <sup>3</sup> КОЕ/мл<br>Hydrocarbon-oxidizing bacteria, *10 <sup>3</sup> CFU/ml       | <u>0.05–0.55</u><br>0,23 ± 0,05        | <u>0.80–23.00</u><br>7,20 ± 2,00     | <u>0.14–21.00</u><br>1,40 ± 0,47  |
| Общее микробное число, *10 <sup>3</sup> КОЕ/мл<br>Total microbial count, *10 <sup>3</sup> CFU/ml                         | <u>0.03–0.24</u><br>0,07 ± 0,02        | <u>0.10–45.90</u><br>6,00 ± 9,31     | <u>0.18–13.00</u><br>1,00 ± 0,48  |
| Общие колиформные бактерии, *10 <sup>3</sup> КОЕ/л<br>Total coliform bacteria, *10 <sup>3</sup> CFU/l                    | <u>0.8–40.7</u><br>1,9 ± 4,6           | <u>300.0–1324.3</u><br>823,5 ± 139,6 | <u>38.4–837.8</u><br>103,6 ± 50,0 |
| СБ/ОЧБ, %<br>SB/ TAB, %                                                                                                  | <u>0.01–0.15</u><br>0,09 ± 0,02        | <u>0.10–3.55</u><br>0,54 ± 0,16      | <u>0.02–0.70</u><br>0,16 ± 0,06   |
| K <sub>c</sub><br>C <sub>sp</sub>                                                                                        | <u>1.0–55.8</u><br>10,2 ± 2,4          | <u>1.1–30.0</u><br>4,4 ± 1,0         | <u>1.0–45.1</u><br>3,8 ± 1,1      |

Примечание.  $K_c$  – коэффициент самоочищения.

Note.  $C_{sp}$  – self-purification coefficient.

Таблица 3. Факторные нагрузки признаков в значениях двух главных компонент показателей бактериопланктона р. Неглинки за 2015 г.

Table 3. Factor loadings of features in the values of two main components of bacterioplankton indicators in the Neglinka River in 2015

| Показатель<br>Indicator                                          | Главная компонента 1<br>Principal Component 1 | Главная компонента 2<br>Principal Component 2 |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Общая численность бактерий<br>Total abundance of bacteria        | <b>–0,8</b>                                   | 0,5                                           |
| Общие колиформные бактерии<br>Total coliform bacteria            | <b>–0,9</b>                                   | –0,3                                          |
| Общее микробное число<br>Total microbial count                   | <b>–0,9</b>                                   | –0,1                                          |
| Сапрофитные бактерии<br>Saprophytic bacteria                     | <b>–0,9</b>                                   | –0,1                                          |
| Гетеротрофные бактерии<br>Heterotrophic bacteria                 | <b>–1,0</b>                                   | 0,0                                           |
| Фенолоксиляющие бактерии<br>Phenol-oxidizing bacteria            | <b>–0,9</b>                                   | 0,0                                           |
| Углеводородоксиляющие бактерии<br>Hydrocarbon-oxidizing bacteria | <b>–0,9</b>                                   | 0,0                                           |
| Доля в общей дисперсии, %<br>Share in total variance, %          | 84                                            | 6                                             |

Примечание. Жирным шрифтом выделены нагрузки признаков с достоверным вкладом ( $p < 0,05$ ) в значения главных компонент.

Note. Loadings of features with a reliable contribution ( $p < 0.05$ ) to the values of the main components are given in bold.

В координатах значений двух главных компонент ГК1 и ГК2 (рис. 3) объекты разделились на две основные группы. В двух правых квадрантах находятся пробы, отобранные за все месяцы наблюдения на загородной станции р. Неглинка (N-1). Левее расположены пробы, отобранные за весь период наблюдения на городских станциях (N-2, N-3). Такое расположение станций в осях главных компонент отражает пространственную неоднородность реки, обусловленную поступлением загрязняющих веществ (нефтепродуктов, легкоминерализуемого ОВ, взвешенных веществ) с ливневыми и терригенными стоками на городском участке реки [Макарова, Калинкина, 2024]. Ранее проведенный анализ показателей химического состава воды р. Неглинка выявил схожую ординацию этих данных в осях главных компонент. Доказано, что содержание фосфора и величина БПК<sub>5</sub> отразили влияние антропогенных факторов, а именно – поступление с ливневым стоком биогенных веществ и органического вещества [Макарова, Калинкина, 2024].

Схожая картина увеличения бактериопланктона на городских участках рек по сравнению с загородным отмечалась и в воде р. Лососинки, также протекающей по территории г. Петрозаводска [Макарова и др., 2022].

В 2015 г. сезонная динамика количественных показателей эколого-трофических групп бактериопланктона была различна на всех участках реки (рис. 4). Численность бактерий на загородном участке р. Неглинка (ст. N-1) в сезонном аспекте характеризовалась двумя подъемами (см. рис. 4). Санитарно-показательные микроорганизмы (ОКБ, ОМЧ) развивались

активно в июле при максимальных значениях температуры воды (10 °С) и в сентябре за счет увеличения объемов выпадения жидких осадков (7 мм за двое суток) накануне отбора проб [Макарова, 2024]. Выявлена значимая связь между показателями ОКБ и ОМЧ, величина коэффициента корреляции Спирмена составила 0,74. Численное развитие СБ и ГБ было максимальным в период увеличения расхода воды – в апреле и ноябре. Коэффициент корреляции Спирмена (0,90) выявил значимую связь между показателями СБ и ГБ. В то же время изменение численности бактерий не было статистически значимо связано с расходом воды. Для УОБ характерны два пика численности: максимальный в апреле и небольшое увеличение в августе. Для ФОБ отмечены три пика численности: максимальный в апреле, затем в июле и ноябре (см. рис. 4).

На ст. N-2 большинство изученных групп бактерий (ОМЧ, СБ, ГБ, УОБ) имели два пика численности – в июне, при максимально отмеченной температуре воды 12 °С, и сентябре. Все рассчитанные коэффициенты корреляции Спирмена между СБ с ОМЧ, ГБ и УОБ составили 0,95, 0,98 и 0,79 соответственно и были значимы (см. рис. 4). Развитие ОКБ повторяло свою динамику на ст. N-1, когда численность достигала максимальных величин в июле и сентябре. Три пика численности были характерны для ОЧБ и ФОБ: в апреле, июне, сентябре для ОЧБ и в апреле, августе и октябре для ФОБ. ОЧБ имела значимую положительную корреляцию с эколого-трофическими группами бактерий, за исключением санитарно-показательных микроорганизмов (ОКБ, ОМЧ) [Макарова, 2024].

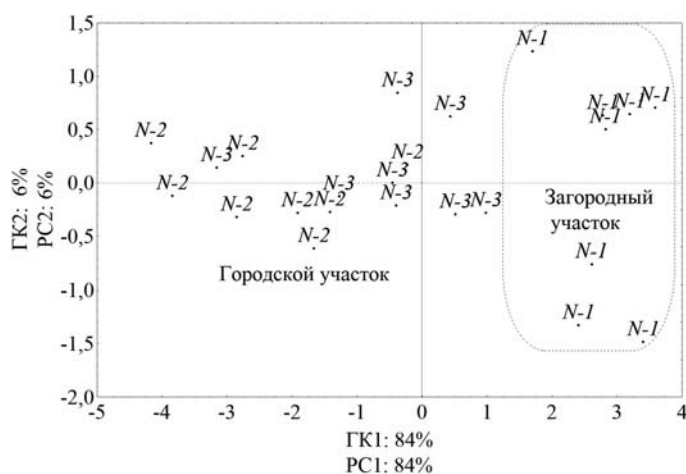


Рис. 3. Визуализация распределения станций р. Неглинка в 2015 г. по результатам отбора микробиологических проб

Fig. 3. Visualization of the distribution of stations on the Neglinka River in 2015 based on the results of microbiological sampling

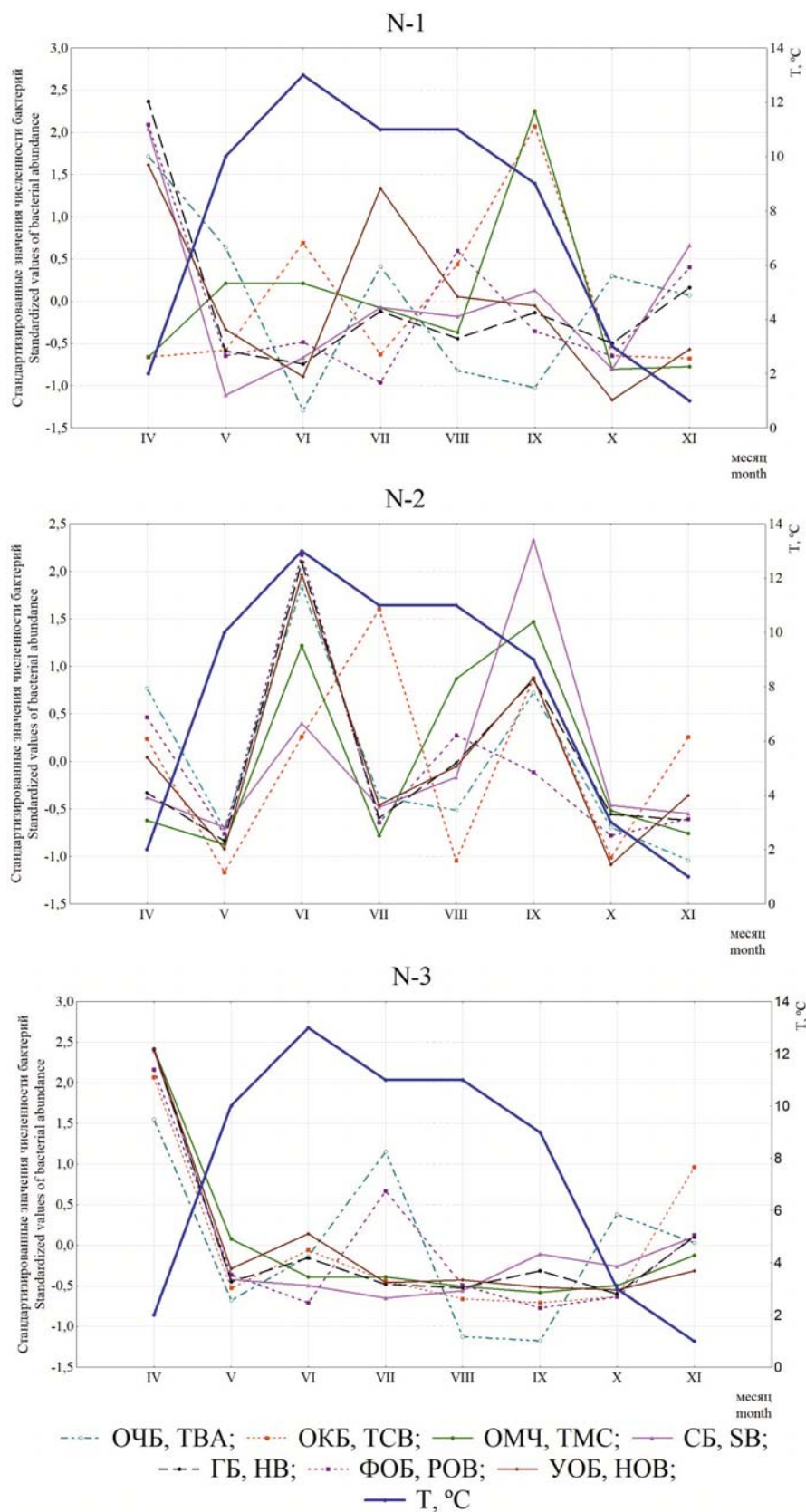


Рис. 4. Сезонная динамика численности эколого-трофических групп бактериопланктона (стандартизированные данные) на городском участке р. Неглинки в 2015 г.

Fig. 4. Seasonal dynamics of the number of ecological-trophic groups of bacterioplankton (standardized data) in the urban section of the Neglinka River in 2015

В приустьевом участке реки (ст. N-3) наблюдалась положительная связь развития бактерий с гидрологической ситуацией (расход воды). Так, ОКБ, ОМЧ, СБ, ГБ достигали высоких показателей в весенне-осеннее половодье (апрель, ноябрь), что связано с поступлением этих бактерий с прилегающей территории. Статистически значимую зависимость численности бактерий от расхода воды удалось установить только для ОМЧ и СБ (коэффициенты корреляции Спирмена составили 0,72 и 0,81 соответственно) (см. рис. 4). Величина ОЧБ имела три подъема численности – в апреле, июле и октябре и положительно коррелировала с изменениями численности ОКБ и ФОБ (значимые коэффициенты корреляции Спирмена с каждой из двух групп бактерий составили 0,72). Численность ФОБ достигала максимального развития в апреле, июле и ноябре. Количественное развитие УОБ было высоким в апреле и июне и положительно коррелировало с развитием ОКБ и ОМЧ (значимые коэффициенты корреляции Спирмена составляли 0,74 и 0,77 соответственно).

Сравнение изученных групп бактериопланктона в приустьевом участке р. Неглинки (ст. N-3) и в Петрозаводской губе Онежского озера (ст. P22) в августе 2015 г. выявило незначительные изменения в показателях ОЧБ (табл. 4). Однако в озерной воде наблюдалось сокращение численности СБ, ГБ, ФОБ и УОБ в 19–34 раза по сравнению с речными водами. Схожая ситуация отмечается при впадении в Петрозаводскую губу р. Лососинки, которая также дренирует территорию г. Петрозаводска [Макарова и др., 2022]. Снижение количества бактерий в воде Петрозаводской губы обусловлено масштабным разбавлением в летний период речных вод озерными и хорошим водообменом в заливе [Лозовик и др., 2019].

Качество воды р. Неглинки оценивали по развитию индикаторных групп бактериопланктона на трех участках реки. Так, о чистоте загородного участка р. Неглинки свидетельствовали низкие показатели общей численности бактерий, а на отсутствие загрязнения воды на загородном участке реки хозяйственно-фекальными стоками указывала невысокая численность сапрофитных (СБ) и общих колиформных бактерий (ОКБ) (табл. 5).

В черте г. Петрозаводска в воде р. Неглинки отмечалось загрязнение легкоминерализуемым органическим веществом, в том числе фекального происхождения, и нефтепродуктами, что подтверждалось интенсивным развитием бактерий – индикаторов сапробности (СБ), условно патогенных микроорганизмов

Таблица 4. Количественные характеристики бактериопланктона приустьевого участка р. Неглинки и в Петрозаводской губе Онежского озера в августе 2015 г.  
Table 4. Quantitative characteristics of bacterioplankton in the mouth area of the Neglinka River and Petrozavodsk Bay of Lake Onego in August 2015

| Показатель<br>Indicator                                                                                      | Станции<br>Stations                  |                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                                                                                              | N-3<br>(устье реки)<br>(river mouth) | P22<br>(Онежское озеро)<br>(Lake Onego) |
| Сапрофитные бактерии, КОЕ/мл<br>Saprophytic bacteria, CFU/ml                                                 | 2200                                 | 101                                     |
| Гетеротрофные бактерии, КОЕ/мл<br>Heterotrophic bacteria, CFU/ml                                             | 10800                                | 316                                     |
| Фенолоксиляющие бактерии, КОЕ/мл<br>Phenol-oxidizing bacteria, CFU/ml                                        | 2900                                 | 137                                     |
| Углеводородоксиляющие бактерии, КОЕ/мл<br>Hydrocarbon-oxidizing bacteria, CFU/ml                             | 1000                                 | 53                                      |
| Общая численность бактерий, *10 <sup>6</sup> кл/мл<br>Total abundance of bacteria, *10 <sup>6</sup> cells/ml | 1,65                                 | 1,27                                    |

(ОКБ, ОМЧ) и индикаторов техногенного загрязнения (ФОБ, УОБ). Численность изученных бактерий позволила классифицировать городские участки р. Неглинки как загрязненные и грязные (см. табл. 5).

Степень загрязненности речной воды, оцениваемая по соотношению СБ/ОЧБ, показала, что городской участок реки является более грязным по сравнению с загородным участком (см. табл. 5).

Полученные величины  $K_c$  (см. табл. 2) на среднем и нижнем участках реки были ниже или равны предельному значению 4. Это свидетельствовало о наличии условно-патогенных микроорганизмов на городских участках реки, что подтверждается данными по численности ОКБ, которая превышала критическое значение для зон рекреационного назначения в 500 КОЕ/100 см<sup>3</sup> в соответствии с [СанПиН 2.1.3685-21] (см. табл. 2 и 5).

Многokратное превышение численности всех групп бактерий на городском участке реки свидетельствовало о неблагоприятной санитарной ситуации. Таким образом, оценка качества воды

Таблица 5. Класс качества и оценка загрязненности воды в р. Неглинке по индикаторным группам бактериопланктона в 2015 г.

Table 5. Water quality in the Neglinka River according to the indicator groups of bacterioplankton in 2015

| Показатель<br>Indicators | Станции<br>Stations                                          |                                                              |                                                              | Ссылка<br>Citation                                               |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                          | N-1                                                          | N-2                                                          | N-3                                                          |                                                                  |
| ОЧБ<br>TAB               | 2, Чистая<br>Clean                                           | 3, Удовлетворительной<br>чистоты<br>Satisfactory cleanliness | 3, Удовлетворительной<br>чистоты<br>Satisfactory cleanliness | Оксиюк и др., 1993<br>Oksiyuk et al., 1993                       |
| СБ<br>SB                 | 2, Чистая<br>Clean                                           | 5, Грязная<br>Dirty                                          | 4, Загрязненная<br>Polluted                                  | «                                                                |
| ОКБ<br>TCB               | 2, Чистая<br>Clean                                           | 5, Грязная<br>Dirty                                          | 4, Загрязненная<br>Polluted                                  | «                                                                |
| ФОБ<br>POB               | 3, Удовлетворительной<br>чистоты<br>Satisfactory cleanliness | 5, Грязная<br>Dirty                                          | 4, Загрязненная<br>Polluted                                  | Виноградов и др., 2001<br>Vinogradov et al., 2001                |
| УОБ<br>NOB               | 4, Загрязненная<br>Polluted                                  | 4, Грязная<br>Dirty                                          | 4, Грязная<br>Dirty                                          | «                                                                |
| ОКБ<br>TCB               | Норма<br>Norm                                                | Непригодна для рекреации<br>Not suitable for recreation      | Непригодна для рекреации<br>Not suitable for recreation      | СанПиН 1.2.3685-21<br>Sanitary Rules and Regulations 1.2.3685-21 |
| СБ/ОЧБ, %<br>SB/TAB, %   | Слабозагрязненная<br>Lightly polluted                        | Грязная<br>Dirty                                             | Загрязненная<br>Polluted                                     | Романенко, 1985<br>Romanenko, 1985                               |

Примечание. Класс качества указан цифрой.

Note. The number indicates the quality class.

по микробиологическим показателям позволила выявить непригодность р. Неглинки для купания, в том числе в районе впадения реки в Онежское озеро.

Результаты микробиологической индикации неблагополучной экологической ситуации в р. Неглинке хорошо согласуются с результатами исследования состояния бентосных сообществ [Слуковский, Полякова, 2017]. Так, в городской черте разнообразие бентоса в р. Неглинке снижается по сравнению с загородным участком. Основу биомассы в устье реки составляют олигохеты, преобладание которых в сообществе свидетельствует о высоком загрязнении реки. Кроме того, установлено, что содержание Pb, Zn, Co, Cu, Ni в организмах олигохет выше концентраций подвижных форм этих металлов в донных отложениях, но ниже уровня валовых концентраций указанных элементов. Это свидетельствует о высоком уровне биодоступности тяжелых металлов для олигохет р. Неглинки г. Петрозаводска.

Рыбы представляют собой высшее звено трофической цепи водоемов и в наилучшей степени отражают экологическую ситуацию в водных объектах. Исследования состояния ихтиофауны [Лукина, Беличева, 2013] показывают, что рыбы р. Неглинки (усатый голец *Barbatula barbatula* (L.) и обыкновенный подкаменщик *Cottus gobio* (L.) подвергаются хроническому сублетальному воздействию загрязняющих веществ.

Отмечалась гиперплазия жаберного эпителия, фиброз в жабрах и желчных протоках, некроз гемопоэтической ткани и гепатоцитов, кистозная дегенерация печени, наличие мелано-макрофагических центров. Также обнаружены неопластические изменения в печени и почках изученных рыб, отловленных в воде р. Неглинки.

## Заключение

Микробиологические исследования р. Неглинки в 2015 г. продемонстрировали сезонные и пространственные изменения в общей численности бактериопланктона и в количестве отдельных эколого-трофических групп бактерий. В период исследований сезонная динамика численности бактерий обуславливалась температурным режимом, поступлением ливневых стоков и терригенным смывом за счет выпадения осадков накануне отборов проб. Однако в большинстве случаев из-за высокой изменчивости микробиологических показателей статистически значимая связь с температурой и расходом воды установлена только для некоторых групп бактерий.

Анализ пространственного распределения бактериопланктона в р. Неглинке выявил значимое увеличение всех изучаемых микробиологических показателей в черте г. Петрозаводска по сравнению с загородным участком реки. На загородном участке р. Неглинки количественные

характеристики большинства изученных показателей бактериопланктона находились в пределах, установленных для незагрязненных вод. В черте города общая численность бактериопланктона соответствовала удовлетворительному качеству воды. Однако численность сапрофитных бактерий, а также бактерий – индикаторов нефтяного и фекального загрязнения воды в 6–45 раз превышала показатели загородного участка реки и характеризовала воду как загрязненную и грязную. По сравнению с ранними исследованиями 2011–2012 гг. численность всех изученных эколого-трофических групп бактериопланктона в речной воде была выше в 1,5–16,6 раза, а численность условно-патогенных бактерий – выше в 3 раза.

Высокое количество индикаторных групп бактериопланктона свидетельствовало о сильном загрязнении речных вод различными органическими веществами, в том числе и фекального происхождения, а также нефтяными углеводородами и фенольными соединениями.

## Литература

- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Состояние поверхностных вод / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации; Федеральное агентство водных ресурсов. URL: <http://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 01.02.2019).
- Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Ресурсы речного стока и водный баланс Онежского озера // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.
- Бородулина Г. С. Подземные воды // Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регоранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 31–41.
- Виноградов Г. А., Жариков Г. П., Березина Н. А., Лаптева Н. А., Клайн Н. П., Курбатова С. А., Маврин А. С. Разработка региональной классификации качества вод на основе мониторинга р. Которосль и ее притоков // Экологические проблемы Верхней Волги / Отв. ред. А. И. Копылов. Ярославль: ЯГТУ, 2001. С. 210–221.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2016 году / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; отв. ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 260 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2017 году / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; отв. ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 292 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2018 году / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; отв. ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. 314 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 году / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; отв. ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 248 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 году / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; отв. ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 277 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2021 году / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; отв. ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 263 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2022 году / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; отв. ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023. 265 с.
- Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
- Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 1. С. 91–101. doi: 10.31857/S0321-059646191-101
- Лукина Ю. Н., Беличева Л. А. Оценка качества вод на основе биомаркеров // Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие / Ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регоранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 85–91.
- Макарова Е. М. Оценка экологического состояния высокогумусных притоков Онежского озера по комплексу микробиологических и химических показателей: Дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2024. 187 с.
- Макарова Е. М., Калинкина Н. М., Сабылина А. В. Возможность применения микробиологических показателей для оценки состояния водотоков с высокой цветностью воды (на примере притоков Онежского озера) // Принципы экологии. 2023. № 3. С. 36–50. doi: 10.15393/j1.art.2023.14043
- Макарова Е. М., Калинкина Н. М. Проблемы оценки качества высокоцветной воды притока Онежского озера, протекающего по урбанизированной территории, по гидрохимическим, микробиологическим и токсикологическим показателям // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 6. С. 1399–1433. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1399
- Макарова Е. М., Теканова Е. В., Калинкина Н. М. Состояние бактериопланктона р. Лососинки (притока Онежского озера) и качество воды по микробиологическим показателям // Поволжский экологический журнал. 2022. № 3. С. 292–306. doi: 10.35885/1684-7318-2022-3-292-306
- МУК 4.2.1884-04. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический

анализ воды поверхностных водных объектов». Методические указания / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; утв. 3 марта 2004 года.

Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Ч. 3: Гидрографические описания рек и озер / Отв. ред. В. Е. Водогребский. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 959 с.

Решетняк О. С. Антропогенная нагрузка и изменчивость состояния экосистем на различных участках реки Ока // Вода: химия и экология. 2018. Т. 116, № 7–9. С. 110–118.

Романенко В. И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука, 1985. 295 с.

Румянцев В. А., Коронкевич Н. И., Измайлова А. В., Георгиади А. Г., Зайцева И. С., Барабанова Е. А., Дробкова В. Г., Корнеевская Н. Ю. Водные ресурсы рек и водоемов России и антропогенные воздействия на них // Известия РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85, № 1. С. 120–135. doi: 10.31857/S258755662101012X

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; утв. 28 января 2021 г.

Сабылина А. В., Ефремова Т. А. Тенденции изменения поступления химических веществ с водами малых рек юго-западного побережья Онежского озера за последние 50 лет // Экологическая химия. 2017. Т. 26, № 6. С. 333–339.

Слуковский З. И., Полякова Т. Н. Анализ накопления тяжелых металлов в организме олигохет из речных донных отложений урбанизированной среды // Биология внутренних вод. 2017. № 3. С. 73–82. doi: 10.7868/S032096521703010X

Теканова Е. В., Макарова Е. М., Калинкина Н. М. Оценка состояния воды притоков Онежского озера в условиях антропогенного воздействия по микробиологическим и токсикологическим показателям // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 44–52. doi: 10.17076/lim35

Тыркин И. А., Щуров И. Л., Ивантер Д. Э., Широков В. А., Шустов Ю. А. Лососинка: перспективы возрождения статуса лососевой реки // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 4. С. 26–30.

Andronikov A. V., Novak M., Borodulina G. S., Efremenko N. A., Andronikova I. E., Chesalina G. L., Levichev M. A., Subetto D. A., Sebek O., Zobkova M. V. One river, two streams: chemical and chromium isotopic features of the Neglinka River (Karelia, northwest Russia) // Hydrol. Sci. J. 2019. Vol. 64, no. 8. P. 974–982. doi: 10.1080/02626667.2019.1617418

Kemp P. F., Sherr B. F., Sherr E. B., Cole J. J. (eds.). Handbook of methods in aquatic microbial ecology. Washington: Lewis Publ., CRC Press LLC, 1993. 800 p.

## References

Andronikov A. V., Novak M., Borodulina G. S., Efremenko N. A., Andronikova I. E., Chesalina G. L., Levichev M. A., Subetto D. A., Sebek O., Zobkova M. V. One river, two streams: chemical and chromium isotopic features of the Neglinka River (Karelia, northwest Russia). *Hydrol. Sci. J.* 2019;64(8):974–982. doi: 10.1080/02626667.2019.1617418

Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS GMVO). State of surface waters. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation; Federal Agency for Water Resources. (In Russ.) URL: <http://gmvo.sknivh.ru> (accessed: 01.02.2019).

Balaganskii A. F., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Salo Yu. A. River flow resources and water balance. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact.* Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 31–38. (In Russ.)

Borodulina G. S. Underground waters. *Vodnye ob"ekty goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie = Water objects of Petrozavodsk: a study guide.* Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. P. 31–41. (In Russ.)

Gromtsev A. N. (ed.). State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2016. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2017. 260 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N. (ed.). State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2017. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2018. 292 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N. (ed.). State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2018. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2019. 314 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N. (ed.). State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2019. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 248 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N. (ed.). State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2020. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. 277 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N. (ed.). State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2021. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2022. 263 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N. (ed.). State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2022. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2023. 265 p. (In Russ.)

Kemp P. F., Sherr B. F., Sherr E. B., Cole J. J. (eds.). Handbook of methods in aquatic microbial ecology. Washington: Lewis Publ., CRC Press LLC; 1993. 800 p.

- Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. Methods for studying aquatic microorganisms. Moscow: Nauka, 1989. 288 p. (In Russ.)
- Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Assessing external water exchange of lake bays by water chemistry characteristics. *Water Resources*. 2019;46(1):94–102. doi: 10.1134/S0097807818050123
- Lukina Yu. N., Belicheva L. A. Assessment of water quality based on biomarkers. *Vodnye ob"ekty goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie = Water objects of Petrozavodsk: a study guide*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. P. 85–91.
- Makarova E. M. Assessment of the ecological state of high-humus tributaries of Lake Onega based on a set of microbiological and chemical indicators: DSc. (Cand. of Biol.) thesis. Petrozavodsk; 2024. 187 p. (In Russ.)
- Makarova E. M., Kalinkina N. M. Problems of quality assessment of highly colored water of the Lake Onego urbanized tributary using hydrochemical, microbiological and toxicological indicators. *Limnology and Freshwater Biology*. 2024;6:1399–1433. (In Russ.). doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1399
- Makarova E. M., Kalinkina N. M., Sabylina A. V. The possibility of using microbiological indicators to assess the state of watercourses with high water color (on the example of tributaries of Lake Onego). *Printsipy ekologii = Principles of the Ecology*. 2023;3:36–50. (In Russ.). doi: 10.15393/j1.art.2023.14043
- Makarova E. M., Tekanova E. V., Kalinkina N. M. Bacterioplankton status in the Lososinka River (a tributary of Lake Onego) and the water quality by microbiological indicators. *Biol. Bull.* 2022;49(10):1996–2003. doi: 10.1134/S1062359022100363
- MG 4.2.1884-04. Control methods. Biological and microbiological factors. *Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of water from surface water bodies*. Methodological guidelines. Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; app. March 3, 2004. (In Russ.)
- Oksiyuk O. P., Zhukinskii V. N., Braginskii L. P., Linnik P. N., Kuzmenko M. I., Klenus V. G. Integrated ecological classification of land surface water quality. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Hydrobiological Journal*. 1993;29(4):62–76. (In Russ.)
- Reshetnyak O. S. Anthropogenic load and variability of ecosystem conditions in different sections of the Oka River. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: Chemistry and Ecology*. 2018;116(7–9):110–118. (In Russ.)
- Romanenko V. I. Microbiological processes of production and destruction of organic matter in inland waters. Leningrad: Nauka; 1985. 295 p. (In Russ.)
- Rumyantsev V. A., Koronkevich N. I., Izmailova A. V., Georgiadi A. G., Zaitseva I. S., Barabanova E. A., Drabkova V. G., Korneenkova N. Yu. Water resources of rivers, lakes and reservoirs of Russia and anthropogenic impact on them. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya = Proceed. RAS. Geogr. Ser.* 2021;85(1):120–135. (In Russ.). doi: 10.31857/S258755662101012X
- SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness to humans from environmental factors. Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; app. January 28, 2021. (In Russ.)
- Sabylina A. V., Efremova T. A. Trends of changes in receiving chemicals with waters of small rivers in the southwest coast of Lake Onego for the last 50 years. *Ekologicheskaya khimiya = Environmental Chemistry*. 2017;26(6):333–339. (In Russ.)
- Slukovskii Z. I., Polyakova T. N. Analysis of accumulation of heavy metals from river bottom sediments of the urban environment in the bodies of oligochaetes. *Inland Water Biology*. 2017;10(3):315–322. doi: 10.1134/S1995082917030154
- Tekanova E. V., Makarova E. M., Kalinkina N. M. An assessment of the condition of the water of Lake Onego inflowing streams under human impact influence using microbiological and toxicological parameters. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2015;9:44–52. (In Russ.). doi: 10.17076/lim35
- Tyrkin I. A., Shchurov I. L., Ivanter D. E., Shirokov V. A., Shustov Yu. A. The Lososinka River: prospects for the restoration of its status as a salmon river. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta = Proceed. Petrozavodsk State University*. 2011;4:26–30. (In Russ.)
- Vinogradov G. A., Zharikov G. P., Berezina N. A., Lapteva N. A., Klein N. P., Kurbatova S. A., Mavrin A. S. Development of a regional classification of water quality based on monitoring of the Kotorosl River and its tributaries. *Ekologicheskie problemy Verkhnei Volgi = Environmental problems of the Upper Volga*. Yaroslavl: YaGTU; 2001. P. 210–221. (In Russ.)
- Vodogretskii V. E. (ed.). Surface water resources of the USSR. Vol. 2: Karelia and the North-West. Part 3: Hydrographic descriptions of rivers and lakes. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1972. 959 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 25.06.2025; принята к публикации / accepted: 22.09.2025.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Макарова Елена Михайловна**

канд. биол. наук, научный сотрудник  
лаборатории гидробиологии

e-mail: emm777@bk.ru

## CONTRIBUTOR:

**Makarova, Elena**

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

УДК 504.05

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ И ЭМЕРДЖЕНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ВОДНОГО ОБЪЕКТА

Н. А. Панютин<sup>1\*</sup>, В. В. Дмитриев<sup>1</sup>, Е. А. Примак<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет (Университетская набережная, 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034), \*[nic9898@yandex.ru](mailto:nic9898@yandex.ru)

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет (Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007)

Актуальность исследования определяется необходимостью совершенствования современных методов оценки экологического и геоэкологического статуса природных объектов как сложных систем при различном сочетании их состава, свойств и приоритетов оценочных исследований. Традиционно при решении проблемы выбора нормирующей функции как этапа построения интегральных показателей в научных публикациях не обсуждаются вид связи (прямая или обратная) и возможность учета нелинейности связи параметров с оцениваемым системным свойством. В работе продемонстрировано сравнение результатов интегральной оценки экологического статуса, полученных с помощью различных моделей-классификаций, с учетом использования в нормирующих функциях как линейных, так и нелинейных способов отображения взаимосвязи между параметрами и свойствами системы. Сравнение выполнено на уровне количественной оценки субиндексов и итогового значения интегрального показателя экологического статуса водоема (ИПЭС) в реализованных вариантах. В качестве ключевого водоема выбрано озеро Волковское (Суури) на севере Карельского перешейка. Для озера собрана обширная база данных по физическим, химическим и биологическим параметрам, связанным с определением трофности, качества и токсического загрязнения воды, потенциальной устойчивости водоема, позволившим оценить его экологический статус. Первая задача исследования – установить, сильно ли изменятся значения субиндекса трофности (ИПТ) с введением нелинейной связи между критериями оценки и индексом трофности. Варианты изменения значений, учитывающих степень нелинейности  $\lambda$  в приведенных в статье нормирующих функциях, включали только положительные значения: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0. Основная задача исследователя – в будущих оценках обосновать значение данного параметра для каждого учитываемого критерия. Эксперименты проводились в упрощенном варианте. Параметр  $\lambda$  задавался одним для всех критериев, входящих в субиндекс ИПТ. Вторая задача – выяснить, насколько изменится ИПЭС с учетом нелинейности связи в индексе ИПТ и изменения приоритетов (весов) учета субиндекса ИПТ на последнем этапе свертки. При этом для остальных учитываемых субиндексов (субиндекс качества воды ИПК и субиндекс потенциальной устойчивости ИПУ) сохранялась линейная связь параметров с оцениваемым свойством на всех этапах свертки показателей. Расчеты представлены в графической и табличной форме.

В результате исследования выявлено, что изменение параметра  $\lambda$  в сторону уменьшения степени нелинейности дает в итоге сдвиг вправо по оценочной шкале ИПЭС, а при увеличении этого параметра отмечено, что значения ИПЭС сдвигаются влево по оценочной шкале. Рассмотрены варианты изменения степени нелинейности и приоритета (веса) ИПТ в оценке ИПЭС.

Ключевые слова: экологический статус; трофический статус; интегральная оценка; нормирующие функции; показатель степени нелинейности  $\lambda$

Для цитирования: Панютин Н. А., Дмитриев В. В., Прима Е. А. Интегральная оценка экологического статуса с учетом нелинейности взаимосвязи между параметрами и эмерджентными свойствами водного объекта // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 119–130. doi: 10.17076/lim2210

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00683-а «Теоретико-методологическое обоснование, математический аппарат и модели интегральной оценки экологического статуса и экологического благополучия водных объектов» СПбГУ. Регистрационный номер НИОКТР: АААА-А19-119022790015-9.

**N. A. Paniutin<sup>1\*</sup>, V. V. Dmitriev<sup>1</sup>, E. A. Primak<sup>2</sup>. INTEGRAL ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATUS TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEAR RELATIONSHIP BETWEEN PARAMETERS AND EMERGENT PROPERTIES OF THE WATER BODY**

<sup>1</sup> St. Petersburg State University (7-9 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia), \*nic9898@yandex.ru

<sup>2</sup> Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia)

The study is warranted by the need to improve the methods for assessing the ecological and geoecological status of natural features as complex systems for various combinations of their composition, properties, and priorities of evaluative research. Traditionally, when solving the problem of selecting a normalization function as a stage in constructing integral indicators, scientific publications do not discuss the nature of the relationship (direct or inverse) or the possibility of accounting for nonlinearity between the system's parameters and the property under assessment. This paper demonstrates a comparison of the results of an integrated ecological status assessment obtained by various classification models, taking into account both linear and nonlinear methods of representing the relationship between parameters and system properties in normalization functions. The comparison was performed at the level of quantitative estimates of sub-indices and the final value of the integrated water body ecological status indicator (IESI). The key water body selected for this study is Lake Volkhovskoe (Suuri) on northern Karelian Isthmus. An extensive database was compiled for this lake, including physical, chemical, and biological parameters related to the trophic status, water quality, toxic contamination, and potential resilience, which allowed for an assessment of its ecological status. The first task was to determine how much the values of the trophic sub-index (TSI) would change upon factoring in a nonlinear relationship between evaluation criteria and the trophic index. The variants considering different degrees of nonlinearity  $\lambda$  in the normalization functions presented in this paper included only positive values: 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 3.0. The main challenge for future assessments is to substantiate an appropriate value for this parameter for each criterion considered. Experiments were conducted in a simplified form. The parameter  $\lambda$  was set to a single value for all criteria included in the TSI sub-index. The second task was to determine how much the IESI would change when accounting for nonlinearity in the TSI index and adjusting the priorities (weights) assigned to TSI during the final convolution stage. Meanwhile, linear relationships between parameters and system properties were maintained for other sub-indices (water quality sub-index WQTP1 and potential resilience sub-index WBRI) throughout all convolution steps. The calculations are presented both graphically and in tabular form. The study revealed that a reduction in  $\lambda$ , and thus in nonlinearity, shifts values on the IESI evaluation scale to the right, while an increasing in  $\lambda$  causes a shift to the left on this scale. Variations in both nonlinearity degree and priority (weight) assigned to TSI during IESI assessment were considered.

Keywords: ecological status; trophic status; integral assessment; normalization functions; nonlinearity degree parameter  $\lambda$

For citation: Paniutin N. A., Dmitriev V. V., Primak E. A. Integral assessment of the ecological status taking into account the nonlinear relationship between parameters and emergent properties of the water body. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 119–130. doi: 10.17076/lim2210

Funding. The study was supported by RFBR grant #19-05-00683-a “Theoretical methodological rationale, mathematical toolkit and models for integral assessment of the ecological status and ecological wellbeing of water bodies” to St. Petersburg State University. R&D action ID: AAAA-A19-119022790015-9.

## Введение

Многокритериальные и интегральные оценки экологического состояния наземных и водных экосистем, их интегративных (эмерджентных) свойств и функций, факторов, влияющих на них, получили большое распространение в научных публикациях конца XX – начала XXI в. Особый интерес со стороны научного сообщества и общественности вызывают такие интегративные свойства, как продуктивность, качество и токсическое загрязнение среды, устойчивость (уязвимость) наземных экосистем и водных объектов суши, особенно объектов с замедленным водообменом – озер и водохранилищ, находящихся в существующих или планируемых местах влияния на них общества и использующихся им как источники чистой и пресной воды.

Теоретико-методологические подходы к оценке интегративных свойств и функций сложных систем в природе и обществе в условиях дефицита информации и неопределенности суждений об их составе и свойствах заложены в конце 1990-х гг. и приводятся в трудах проф. СПбГУ Н. В. Хованова, его соавторов и учеников [Хованов, 1996, 1998; Александрова и др., 2000; Мякишева, 2009; Корников и др., 2012 и др.].

В последние годы широкое развитие получила идея оценки экологического (ЭС) и геоэкологического (ГЭС) статуса природных объектов (в англоязычной литературе этот термин чаще употребляется как «ecological status»). В литературе их определение имеет множество смысловых значений и коннотаций. В первом примере авторы нацеливаются прежде всего на оценку качества среды всех геосфер Земли [Brousseau et al., 2020], в другом случае на первый план выходит оценка устойчивости системы, поскольку авторы считают, что «здоровая система» прежде всего должна быть устойчивой к изменению своих свойств и параметров режимов («здоровье экосистемы», по их мнению, связано с устойчивостью: если устойчивость нарушена, то такая экосистема теряет свой

исходный (здоровый) статус) [Haskell et al., 1992; Meyer, 1997; Chessman, 2002], в третьем случае для оценки геоэкологического статуса водоемов авторы рекомендуют прежде всего оценивать загрязнение донных отложений водоемов [Даувальтер, 2012].

Актуальность исследования определяется необходимостью совершенствования современных методов оценки ЭС и ГЭС природных объектов как сложных систем при различном сочетании их состава, свойств и приоритетов оценочных исследований.

Одно из последних определений ЭС авторов статьи для оценки интегративных свойств водных объектов сформулировано следующим образом: экологический статус водоема – это его интегративное свойство, которое определяется сочетанием его способностей: 1 – продуцировать органическое вещество (в работе эта способность будет характеризоваться как «трофность» (кормность) и выражаться субиндексом ИПТ – интегральный показатель трофности); 2 – изменять химический и биологический состав, качество и токсическое загрязнение воды (субиндекс ИПК); 3 – сохранять потенциальную устойчивость (ИПУ), под которой понимается устойчивость к изменению физико-географической среды, климатических и гидрологических характеристик и элементов режимов [Панютин, Дмитриев, 2024]. Ранее нами в оценку экологического состояния были введены два этапа: *экологическая регламентация* и *экологическое нормирование*; позднее определены *геоэкологическая регламентация*, под которой понимался анализ параметров состояния антропогенно трансформированной геосистемы, определение интервалов изменений элементов ее режимов (естественного и антропогенного), выявление пороговых и критических величин этих параметров, и *геоэкологическое нормирование* антропогенного воздействия на геосистему, при котором можно оценить реакцию системы в целом или какого-либо ее критического звена на это воздействие. Под критическим

звеном понималась наиболее уязвимая (слабая) экосистема. Это означало, что допустимая нагрузка на эту экосистему принимается в качестве допустимой нагрузки для геосистемы в целом [Дмитриев, 2020].

Работа с оценочными шкалами, выбранными для построения субиндексов (экологическая квалиметрия), предполагает работу с ГОСТами, авторскими шкалами, с последующим переходом от натуральных значений характеристик  $x_i$  к их нормированным значениям  $q_i$  или  $q_i(x_i)$ . Для этого предлагались разные нормирующие функции, от простейшей функции «минимакса» вида  $x_i/\max_i$  до различных аналитических функций, приведенных в [Воробейчик и др., 1994]. Однако эти и близкие к ним функции традиционно не учитывают нелинейность связи характеристик с оцениваемым свойством и вид связи (прямая – обратная). Чаще всего такие возможности вообще не оговариваются авторами или подразумевается, что все  $x_i$  положительно связаны с изменением оцениваемого свойства или состояния системы. Не все нормирующие функции включают в себя  $\min$ ,  $\max$  и дополнения, позволяющие работать со значениями  $<\min$  и  $>\max$ . В связи с этим в наших исследованиях, по рекомендации Н. В. Хованова [1996],  $q_i$  предлагается получать с помощью нормирующих функций вида (1) и (2):

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq \min_i, \\ \left( \frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \min_i < x_i \leq \max_i, \\ 1, & x_i > \max_i \end{cases} \quad (1)$$

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \leq \min_i, \\ \left( \frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \min_i < x_i \leq \max_i, \\ 0, & x_i > \max_i. \end{cases} \quad (2)$$

Графически они имеют вид, представленный на рис. 1.

Функция (1) используется в случае, если увеличение значения  $i$ -й исходной характеристики не приводит к снижению интегративного свойства (качества), оцениваемого с точки зрения  $i$ -го критерия. При этом всем параметрам  $x_i$  с показателями, не превосходящими некоторого фиксированного уровня  $\min_i$ , приписывается минимальное значение  $i$ -го нормированного показателя, а параметрам со значениями  $x_i$ , превосходящими фиксированный уровень, приписывается  $\max_i$  – максимальное значение этого показателя. Исследователь также должен задать показатель степени  $\lambda$ , который определяет характер и степень выпуклости нормирующей функции  $q_i(x_i)$ . В случае неубывающей функции (1) при  $\lambda > 1$  нормирующая функция выпукла вниз, а при  $\lambda < 1$  – вверх. Последнее требование, как правило, либо не оговаривается авторами, либо во всех случаях принимается  $\lambda = 1$  на том основании, что на первом этапе исследований будем исходить из того, что все  $x_i$  линейно связаны с оцениваемым свойством. После этого логично показать, насколько сильно изменится полученный результат с учетом нелинейности взаимосвязи между параметрами и оцениваемым свойством природного объекта (системы). Но в подавляющем

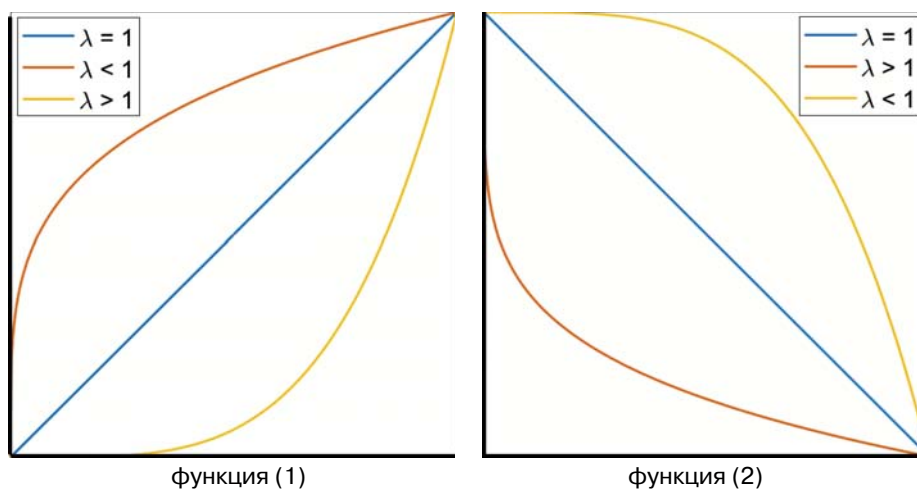


Рис. 1. Примеры возрастающей (1) и убывающей (2) нормирующих функций, использующихся для получения нормированных значений исходных показателей

Fig. 1. Increasing (1) and decreasing (2) normalization functions used to obtain normalized values of the initial indicators

большинстве случаев этого не делается. Более подробно использование нормирующих функций описано в работе [Novanov et al., 2009].

Целью работы является сравнение результатов интегральной оценки ЭС, полученных на разных моделях-классификациях при условии использования в нормирующих функциях линейного представления взаимосвязи параметров с исследуемым свойством системы и нелинейным представлением этой связи. Также работа нацелена на сравнение количественной оценки субиндексов и конечного результата расчетов интегрального показателя экологического статуса водоема (ИПЭС) в этих подходах. По опыту исследований ранее нами отмечено, что многие связи между параметром и оцениваемым свойством в природных системах являются нелинейными, но, как правило, это не учитывается при нормировании. Отмечено также, что их использование позволяет привести оценочные шкалы к более равномерному виду, при этом устраняется часто встречающаяся проблема, когда в один класс входит 50–70 % от всей оценочной шкалы, поскольку, например, максимум значения одной или нескольких характеристик в шкалах был задан неоправданно высоким [Примаков, 2009]. В другом случае авторы предлагают решать эту проблему на основе других приемов [Фрумин, Малышева, 2020].

В статье рассмотрены сценарии, при которых  $\lambda$  имеет различные значения, определяемые видом связи (1) или (2). На примере расчета интегрального показателя трофического статуса (ИПТ), входящего в качестве одного из трех

субиндексов в модель-классификацию интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС), будут также получены сравнительные оценки влияния  $\lambda$  на изменение ИПЭС водоема.

## Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана экосистема малого озера в Северо-Западном Приладожье (оз. Волковское, или Суури), находящегося в северо-восточной части Карельского перешейка (Приозерский муниципальный район Ленинградской области) (рис. 2). Озеро Волковское связано с крупнейшим озером Европы – Ладожским – через ручей Мянтылампи. Расстояние до Ладоги составляет 1,5 км. Озеро небольшое: его площадь около 0,3 км<sup>2</sup> (без учета островов), максимальная глубина – 5,5 м [Кузнецов, Субетто, 2019].

На западном берегу озера находится учебно-научная база Санкт-Петербургского государственного университета «Приладожская». На базе с 1986 по 2023 г. проводились учебные практики по дисциплинам, связанным с оценкой экологического состояния водных объектов. В результате собрана обширная информационная база по параметрам и создана «База данных для выявления экологического статуса и факторов массообмена в водной экосистеме на примере озера Суури (LAKE-SUURI-ECOSYSTEM)» [Седова и др., 2019]. На основе информации, содержащейся в БД, подготовлена серия статей с характеристикой экологического состояния водоема в разные годы [Dmitriev et al., 2020].

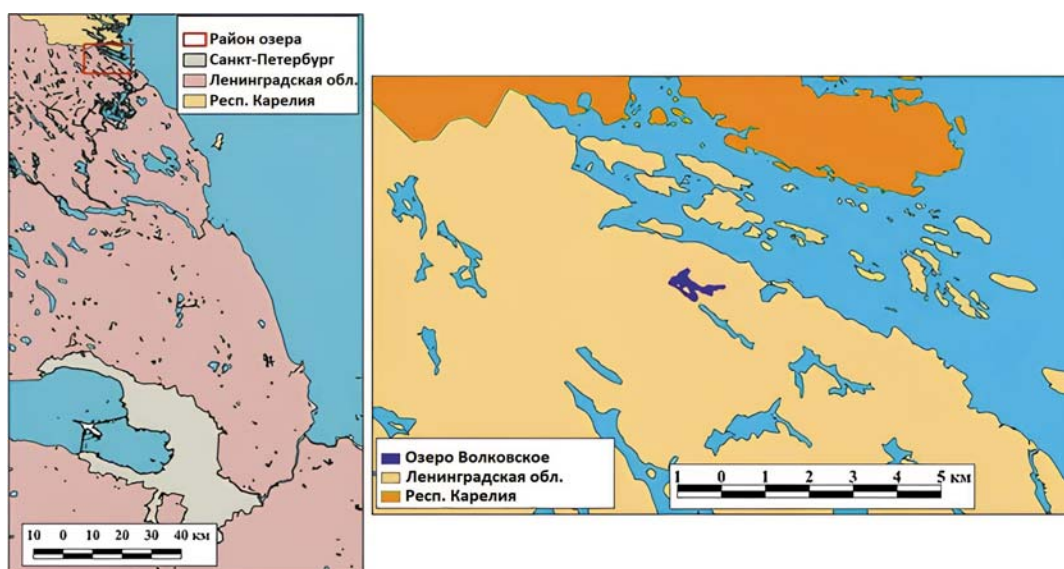


Рис. 2. Картосхема расположения оз. Волковское (Суури)

Fig. 2. Schematic map of the location of Lake Volkovskoye (Suuri)

Для определения ИПТ водных объектов были построены три авторских модели-классификации, одна из которых приведена в табл. 1. Внешний вид всех оценочных шкал для других моделей-классификаций представлен ранее в работе [Почепко и др., 2024].

Данная модель включает 16 параметров, объединенных в три субиндекса. Первый субиндекс представлен интегральным показателем трофности. Он, в свою очередь, включал три субиндекса второго порядка – ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3. В состав ИПТ1 вошли 4 гидрофизических критерия; в ИПТ2 включены 5 гидрохимических параметров; в ИПТ3 вошли 7 гидробиологических характеристик. В табл. 1 приведены оценочные шкалы для субиндексов. Для субиндекса ИПТ1 выбраны: 1 – прозрачность воды по белому диску, м; 2 – отношение прозрачности к глубине; 3 – взвешенные вещества, мг/дм³; 4 – электропроводность, мкСм/см. Для ИПТ2 выбраны: 5 – рН при 100% насыщении воды кислородом; 6 – концентрация растворенного кислорода, в % насыщения; 7 – БПК<sub>5</sub>, мг О<sub>2</sub>/л; 8 – концентрация общего азота, N<sub>общ</sub>, мкг/л; 9 – концентрация общего фосфора, P<sub>общ</sub>, мкг/л. Для ИПТ3 выбраны: 10 – продукция фитопланктона, мг С/л · сут; 11 – скорость фотосинтеза, мг О/л · сут; 12 – концентрация хлорофилла а, мкг/л; 13 – разность суточной продукции и деструкции (Ф–Д), мг О<sub>2</sub>/л · сут; 14 – средняя биомасса фитопланктона в период вегетации, мг/л; 15 – фильтрационная активность зоопланктона, сут<sup>-1</sup>; 16 – время осветления воды зоопланктоном, сут.

В модели класс «мезотрофия» разделен авторами на два (мезотрофия-1 и мезотрофия-2), поскольку в большинстве случаев в исследуемых водоемах встречаются различные оттенки мезотрофии. Большинство озер Северо-Запада России также попадает в мезотрофный класс. Кроме того, для большинства наших моделей-классификаций используется 5 классов трофности, качества воды, устойчивости. Такой прием позволил и в данном случае также сохранить 5 классов для ИПТ и других субиндексов при оценке ИПЭС.

В ИПТ ряд шкал (например, шкала прозрачности и концентрации хлорофилла а) получены путем предварительного равновесомого сложения нескольких известных авторских шкал. После этого они были включены в представленную модель-классификацию.

Для построения ИПТ необходимо принять решение о количестве классов оценивания и о том, какой результат нормирования характеристик будет соответствовать нулю и какой – единице. В наших моделях ноль чаще соответствует левой границе первого класса, а единица – правой границе последнего класса. Но это зависит от предпочтений авторов. Если, например, первый класс является наиболее продуктивным (а в оценке качества воды – наиболее чистым), то, по логике других авторов, следует приписать левому значению первого класса результат нормирования равный 1,0. В нашем случае, напротив, минимальному значению q<sub>i</sub> = 0 соответствует левая граница первого (олиготрофного) класса, а максимальному значению трофности соответствует q<sub>i</sub> = 1 (правая граница

Таблица 1. Модель-классификация интегральных показателей ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3 при равных приоритетах учета исходных характеристик в субиндексах

Table 1. Model-classification of the integral indicators TSI1, TSI2, and TSI3 with equal priorities (weights) of the initial characteristics in sub-indices

|              | Тип трофии<br>Trophic type        |                                   |                                   |                                   |                                   |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|              | Олиготрофия<br>Oligotrophy        | Мезотрофия-1<br>Mesotrophy-1      | Мезотрофия-2<br>Mesotrophy-2      | Эвтрофия<br>Eutrophy              | Гипертрофия<br>Hypertrophy        |
| ИПТ1<br>TSI1 | 0,000–0,284                       | 0,284–0,421                       | 0,421–0,580                       | 0,580–0,733                       | 0,733–1,000                       |
| ИПТ2<br>TSI2 | 0,0–0,137                         | 0,137–0,283                       | 0,283–0,435                       | 0,435–0,679                       | 0,679–1,000                       |
| ИПТ3<br>TSI3 | 0,000–0,067                       | 0,067–0,209                       | 0,209–0,351                       | 0,351–0,671                       | 0,671–1,000                       |
| ИПТ<br>TSI   | 0,000–0,163<br>Δ = 0,163<br>0,082 | 0,163–0,304<br>Δ = 0,141<br>0,234 | 0,304–0,455<br>Δ = 0,151<br>0,380 | 0,455–0,694<br>Δ = 0,239<br>0,574 | 0,694–1,000<br>Δ = 0,306<br>0,847 |

Примечание. Здесь и далее: ИПТ – интегральный показатель трофности. В верхней строке ИПТ даны левая и правая границы классов; Δ – разница между правой и левой границами; в нижней строке – значение ИПТ для середины класса.  
 Note. Here and hereinafter: TSI – integral assessment of production potential. The left and right class boundaries are given in the top row of the TSI; Δ – difference between the right and left boundaries; the IPT value for the middle of the class – in the bottom row.

гипертрофии). При этом автор должен при построении модели выбирать всегда один из двух подходов, не меняя выбора при переходе к другим субиндексам. Также необходимо проверять правильность выбора нормирующей функции при переходе от первого варианта ко второму.

Этап нормирования включает в себя также выбор (обоснование) параметра  $\lambda$ , если учитывается нелинейность взаимосвязи параметра с оцениваемым свойством системы. Именно этот параметр определяет конкретный вид функции и степень ее нелинейности. В данной статье авторы не дают рекомендаций по определению указанного параметра на основе имеющейся у исследователя информации. Этот вопрос будет рассмотрен в других публикациях. Самый простой прием – подбор  $\lambda$  вручную или на основе стандартной или авторской компьютерной программы по имеющейся у исследователя натурной информации. Отметим, что выявленная на основе одного водоема нелинейная связь не является универсальной и пригодной для задания в других водоемах. Однако опыт, полученный при подборе  $\lambda$ , будет полезен при работе

с другими водоемами. Как указано выше, самое простое построение нормирующих кусочно-линейных функций получается при подстановке в формулы (1) и (2)  $\lambda = 1$ . Результаты этого варианта представлены в табл. 1.

### Результаты

Рассмотрим изменение кривых значений  $q_i$  для середин классов трофности (олиготрофия, мезотрофия, эвтрофия, гипертрофия) при задании разных значений параметра  $\lambda$  (рис. 3). Для лучшей иллюстрации два класса мезотрофии объединены в один, а граница между ними выбрана как середина класса. Анализ рис. 3 позволяет прийти к выводу, что для положительных значений  $\lambda$  при  $\lambda < 1$  функция выпукла вверх (в экспериментах также добавлены следующие значения  $\lambda$ : 0,25; 0,1; 0,05; 0,01), а при  $\lambda > 1$  функция выпукла вниз. Чем сильнее отличие от 1,0 параметра  $\lambda$  в обе стороны, тем кривые более выпуклые. Ниже приведены также значения в виде схем (для середин классов) и в табличной форме (табл. 2).

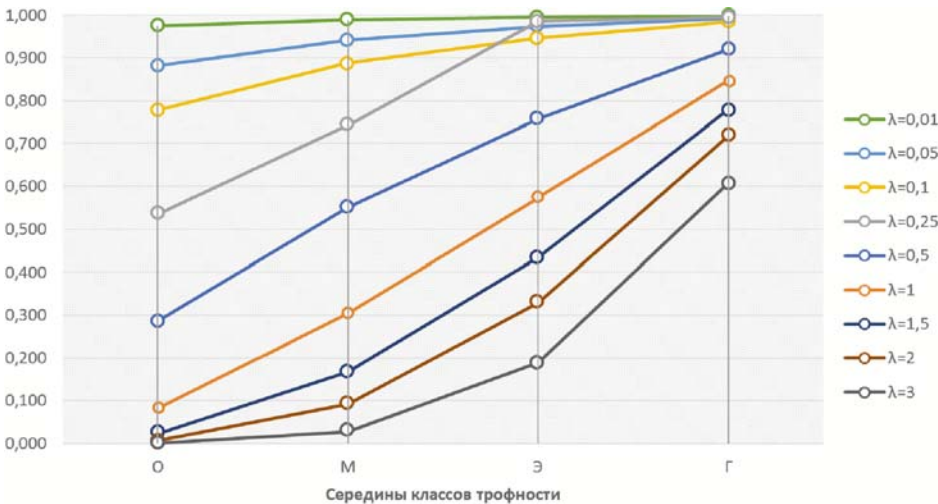


Рис. 3. Кривые нормированных значений для середин классов трофности при различных  $\lambda$

Fig. 3. Curves of normalized mean trophic class values at different  $\lambda$  values

Таблица 2. Средние значения классов ИПТ при разных  $\lambda$  для нормированных шкал

Table 2. Average TSI class values at different  $\lambda$  for normalized scales

| Показатель $\lambda$<br>Index $\lambda$ | Тип трофии<br>Trophic type |                              |                              |                      |                            |
|-----------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------|
|                                         | Олиготрофия<br>Oligotrophy | Мезотрофия-1<br>Mesotrophy-1 | Мезотрофия-2<br>Mesotrophy-2 | Эвтрофия<br>Eutrophy | Гипертрофия<br>Hypertrophy |
| 0,5                                     | 0,231                      | 0,413                        | 0,562                        | 0,736                | 0,918                      |
| 1                                       | 0,072                      | 0,208                        | 0,360                        | 0,565                | 0,844                      |
| 1,5                                     | 0,026                      | 0,118                        | 0,249                        | 0,448                | 0,779                      |
| 2                                       | 0,011                      | 0,073                        | 0,180                        | 0,364                | 0,722                      |
| 3                                       | 0,002                      | 0,031                        | 0,101                        | 0,254                | 0,623                      |

Далее был рассчитан субиндекс ИПТ для разных вариантов, которые затем использовались в расчетах ИПЭС. Наиболее простой вариант, при котором  $\lambda = 1$ , показывает, что оз. Волковское попадает во II класс трофности (ИПТ = 0,285), ближе к середине класса (т. е. в нашей классификации относится к классу «мезотрофия-1»). В этом варианте задания ИПТ индекс ИПЭС получается равным 0,344 и озеро попадает в левую границу III класса.

Затем необходимо было ответить на вопрос, как изменится ИПЭС при изменении приоритетов на последнем уровне свертки субиндексов. В табл. 3 приведены результаты расчета оценочных шкал для трех различных

вариантов свертки показателя ИПЭС: равно-весомый вариант ИПТ = ИПК = ИПУ, вариант ИПТ > ИПК = ИПУ и вариант ИПТ > ИПК > ИПУ. Данные варианты выбраны авторами для наглядности демонстрации степени влияния параметра  $\lambda$  на ИПТ и через него на ИПЭС.

Построение оценочных шкал, приведенных в табл. 3, является необходимым этапом работы, поскольку изменение приоритетов учета субиндексов в сводной оценке требует своей оценочной шкалы ИПЭС. В этом случае сравнивать результаты разных вариантов необходимо не по абсолютным значениям ИПЭС, а по попаданию в определенный класс экологического статуса.

Таблица 3. Результаты построения оценочных шкал интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) для трех вариантов учета приоритетов (весов) на последнем уровне свертки показателей

Table 3. Results of constructing the evaluative scales for the integrated environmental status indicator (IPEC) for three priority weighting options at the final level of indicator aggregation

|                                                                                                                                                                        | Водоем первой категории (I класс)<br>Water body of the first category (Class I) | Водоем второй категории (II класс)<br>Water body of the second category (Class II) | Водоем третьей категории (III класс)<br>Water body of the third category (Class III) | Водоем четвертой категории (IV класс)<br>Water body of the fourth category (Class IV) | Водоем пятой категории (V класс)<br>Water body of the fifth category (Class V) | Вес субиндекса при расчете ИПЭС<br>Weight of the sub-index in the calculation of the IPEC |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вариант 1. Оценочная шкала ИПЭС для равновесных условий ИПТ = ИПК = ИПУ<br>Version 1. Evaluative scale of the IPEC for equilibrium conditions where TSI = WQTPI = WBRI |                                                                                 |                                                                                    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                |                                                                                           |
| ИПТ<br>TSI                                                                                                                                                             | 0,000–0,180                                                                     | 0,180–0,335                                                                        | 0,335–0,500                                                                          | 0,500–0,745                                                                           | 0,745–1,000                                                                    | 0,333                                                                                     |
| ИПК<br>WQTPI                                                                                                                                                           | 0,000–0,193                                                                     | 0,193–0,408                                                                        | 0,408–0,599                                                                          | 0,599–0,802                                                                           | 0,802–1,000                                                                    | 0,333                                                                                     |
| ИПУ<br>WBRI                                                                                                                                                            | 0,000–0,150                                                                     | 0,150–0,264                                                                        | 0,264–0,468                                                                          | 0,468–0,725                                                                           | 0,725–1,000                                                                    | 0,333                                                                                     |
| <b>ИПЭС<br/>IPEC</b>                                                                                                                                                   | <b>0,000–0,174</b>                                                              | <b>0,174–0,336</b>                                                                 | <b>0,336–0,522</b>                                                                   | <b>0,522–0,757</b>                                                                    | <b>0,757–1,000</b>                                                             |                                                                                           |
| Вариант 2. Оценочная шкала ИПЭС для ИПТ > ИПК = ИПУ<br>Version 2. Evaluative scale of the IPEC for equilibrium conditions where TSI > WQTPI = WBRI                     |                                                                                 |                                                                                    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                |                                                                                           |
| ИПТ<br>TSI                                                                                                                                                             | 0,000–0,180                                                                     | 0,180–0,335                                                                        | 0,335–0,500                                                                          | 0,500–0,745                                                                           | 0,745–1,000                                                                    | 0,700                                                                                     |
| ИПК<br>WQTPI                                                                                                                                                           | 0,000–0,193                                                                     | 0,193–0,408                                                                        | 0,408–0,599                                                                          | 0,599–0,802                                                                           | 0,802–1,000                                                                    | 0,150                                                                                     |
| ИПУ<br>WBRI                                                                                                                                                            | 0,000–0,150                                                                     | 0,150–0,264                                                                        | 0,264–0,468                                                                          | 0,468–0,725                                                                           | 0,725–1,000                                                                    | 0,150                                                                                     |
| <b>ИПЭС<br/>IPEC</b>                                                                                                                                                   | <b>0,000–0,177</b>                                                              | <b>0,177–0,335</b>                                                                 | <b>0,335–0,510</b>                                                                   | <b>0,510–0,751</b>                                                                    | <b>0,751–1,000</b>                                                             |                                                                                           |
| Вариант 3. Оценочная шкала ИПЭС для ИПТ > ИПК > ИПУ<br>Version 3. Evaluative scale of the IPEC for equilibrium conditions where TSI > WQTPI > WBRI                     |                                                                                 |                                                                                    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                |                                                                                           |
| ИПТ<br>TSI                                                                                                                                                             | 0,000–0,180                                                                     | 0,180–0,335                                                                        | 0,335–0,500                                                                          | 0,500–0,745                                                                           | 0,745–1,000                                                                    | 0,636                                                                                     |
| ИПК<br>WQTPI                                                                                                                                                           | 0,000–0,193                                                                     | 0,193–0,408                                                                        | 0,408–0,599                                                                          | 0,599–0,802                                                                           | 0,802–1,000                                                                    | 0,277                                                                                     |
| ИПУ<br>WBRI                                                                                                                                                            | 0,000–0,150                                                                     | 0,150–0,264                                                                        | 0,264–0,468                                                                          | 0,468–0,725                                                                           | 0,725–1,000                                                                    | 0,086                                                                                     |
| <b>ИПЭС<br/>IPEC</b>                                                                                                                                                   | <b>0,000–0,181</b>                                                              | <b>0,181–0,349</b>                                                                 | <b>0,349–0,526</b>                                                                   | <b>0,526–0,758</b>                                                                    | <b>0,758–1,000</b>                                                             |                                                                                           |

Таблицы 4–6 демонстрируют результаты расчета ИПЭС на последнем уровне свертки по приведенным выше вариантам задания приоритетов для субиндексов. В этих таблицах приведены ИПЭС для пяти разных вариантов учета приоритетов (весов) на последнем уровне свертки (ИПЭС = ИПТ + ИПК + ИПУ), при которых параметр  $\lambda$  имеет значения 0,5; 1; 3. В отдельных ячейках также приведены все оценочные шкалы

для субиндексов и ИПЭС для всех трех вариантов заданных приоритетов. Близость результатов оценки к левой границе, середине класса или правой границе класса задается буквами «л», «с», «п» соответственно. Отметим, что наибольший вес ИПТ в оценке экологического статуса имеет в варианте 2, а наименьший – в варианте 1 (основной, равновесный вариант). В варианте 2 вес ИПТ в 2,1 раза выше, чем в варианте 1.

Таблица 4. Интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) для озера Волковское (Суури) при разных приоритетах на последнем уровне свертки субиндексов трофности, качества и устойчивости для ИПТ при  $\lambda = 1$

Table 4. The integrated environmental status indicator (IPEC) for Lake Volkovskoe (Suuri) under different priority settings at the final level of sub-index aggregation for trophic status, quality, and sustainability at  $\lambda = 1$  for TSI

| Номер варианта и приоритет интегрального показателя<br>Option number and priority of the integral indicator | Расчет ИПЭС по вариантам<br>Calculation of IPEC by options                     | Водоем первой категории (I класс)<br>Water body of the first category (Class I) | Водоем второй категории (II класс)<br>Water body of the second category (Class II) | Водоем третьей категории (III класс)<br>Water body of the third category (Class III) | Водоем четвертой категории (IV класс)<br>Water body of the fourth category (Class IV) | Водоем пятой категории (V класс)<br>Water body of the fifth category (Class V) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ИПТ = ИПК = ИПУ<br>1. TSI = WQTPI = WBRI                                                                 | $0,285 \times 0,333$<br>$+0,238 \times 0,333$<br>$+0,509 \times 0,333 = 0,291$ | 0,000–0,174                                                                     | 0,174–0,336                                                                        | 0,336–0,522*<br>0,429<br><b>0,344 (IIIл)</b>                                         | 0,522–0,757                                                                           | 0,757–1,000                                                                    |
| 2. ИПТ > ИПК = ИПУ<br>2. TSI > WQTPI = WBRI                                                                 | $0,285 \times 0,700$<br>$+0,238 \times 0,150$<br>$+0,509 \times 0,150 = 0,312$ | 0,000–0,177                                                                     | 0,177–0,335<br>0,256<br><b>0,312 (IIп)</b>                                         | 0,335–0,510                                                                          | 0,510–0,751                                                                           | 0,751–1,000                                                                    |
| 3. ИПТ > ИПК > ИПУ<br>3. TSI > WQTPI > WBRI                                                                 | $0,285 \times 0,636$<br>$+0,238 \times 0,277$<br>$+0,509 \times 0,086 = 0,291$ | 0,000–0,181                                                                     | 0,181–0,349<br>0,265<br><b>0,291 (IIс)</b>                                         | 0,349–0,526                                                                          | 0,526–0,758                                                                           | 0,758–1,000                                                                    |

Примечание. \*Здесь и далее: в первой строке даны левая и правая границы классов; во второй – середина класса; в нижней – результат оценки ИПЭС. В скобках римской цифрой определен класс с указанием близости к левой (л), правой (п) границе или к середине (с) класса.

Note. \*Hereinafter: the first row provides the left and right boundaries of the classes; below are the class midpoints; further, the result of the IPEC assessment is given. In parentheses, a Roman numeral indicates the class, specifying its proximity to the left (л), right (п), or middle (с) of the class.

Таблица 5. Интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) для озера Волковское (Суури) при разных приоритетах на последнем уровне свертки субиндексов трофности, качества и устойчивости для ИПТ при  $\lambda = 0,5$

Table 5. The integrated environmental status indicator (IPEC) for Lake Volkovskoe (Suuri) under different priority settings at the final level of sub-index aggregation for trophic status, quality, and sustainability at  $\lambda = 0,5$  for TSI

| Номер варианта и приоритет интегрального показателя<br>Option number and priority of the integral indicator | Расчет ИПЭС по вариантам<br>Calculation of IPEC by options                     | Водоем первой категории (I класс)<br>Water body of the first category (Class I) | Водоем второй категории (II класс)<br>Water body of the second category (Class II) | Водоем третьей категории (III класс)<br>Water body of the third category (Class III) | Водоем четвертой категории (IV класс)<br>Water body of the fourth category (Class IV) | Водоем пятой категории (V класс)<br>Water body of the fifth category (Class V) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ИПТ = ИПК = ИПУ<br>1. TSI = WQTPI = WBRI                                                                 | $0,534 \times 0,333$<br>$+0,238 \times 0,333$<br>$+0,509 \times 0,333 = 0,427$ | 0,000–0,174                                                                     | 0,174–0,336                                                                        | 0,336–0,522<br>0,429<br><b>0,427 (IIIс)</b>                                          | 0,522–0,757                                                                           | 0,757–1,000                                                                    |
| 2. ИПТ > ИПК = ИПУ<br>2. TSI > WQTPI = WBRI                                                                 | $0,534 \times 0,700$<br>$+0,238 \times 0,150$<br>$+0,509 \times 0,150 = 0,486$ | 0,000–0,177                                                                     | 0,177–0,335                                                                        | 0,335–0,510<br>0,422<br><b>0,486 (IIIп)</b>                                          | 0,510–0,751                                                                           | 0,751–1,000                                                                    |
| 3. ИПТ > ИПК > ИПУ<br>3. TSI > WQTPI > WBRI                                                                 | $0,534 \times 0,636$<br>$+0,238 \times 0,277$<br>$+0,509 \times 0,086 = 0,449$ | 0,000–0,181                                                                     | 0,181–0,349                                                                        | 0,349–0,526<br>0,526<br><b>0,449 (IIIс)</b>                                          | 0,526–0,758                                                                           | 0,758–1,000                                                                    |

Таблица 6. Интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) для озера Волковское (Суури) при разных приоритетах на последнем уровне свертки субиндексов трофности, качества и устойчивости для ИПТ при  $\lambda = 3$   
 Table 6. The integrated environmental status indicator (IPEC) for Lake Volkovskoe (Suuri) under different priority settings at the final level of sub-index aggregation for trophic status, quality, and sustainability at  $\lambda = 3$  for TSI

| Номер варианта и приоритет интегрального показателя<br>Option number and priority of the integral indicator | Расчет ИПЭС по вариантам<br>Calculation of IPEC by options             | Водоем первой категории (I класс)<br>Water body of the first category (Class I) | Водоем второй категории (II класс)<br>Water body of the second category (Class II) | Водоем третьей категории (III класс)<br>Water body of the third category (Class III) | Водоем четвертой категории (IV класс)<br>Water body of the fourth category (Class IV) | Водоем пятой категории (V класс)<br>Water body of the fifth category (Class V) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ИПТ = ИПК = ИПУ<br>1. TSI = WQTPI = WBRI                                                                 | $0,023 \times 0,333 + 0,238 \times 0,333 + 0,509 \times 0,333 = 0,257$ | 0,000–0,174                                                                     | 0,174–0,336<br>0,255<br><b>0,257 (IIC)</b>                                         | 0,336–0,522                                                                          | 0,522–0,757                                                                           | 0,757–1,000                                                                    |
| 2. ИПТ > ИПК = ИПУ<br>2. TSI > WQTPI = WBRI                                                                 | $0,023 \times 0,700 + 0,238 \times 0,150 + 0,509 \times 0,150 = 0,128$ | 0,000–0,177<br>0,088<br><b>0,128 (IC)</b>                                       | 0,177–0,335                                                                        | 0,335–0,510                                                                          | 0,510–0,751                                                                           | 0,751–1,000                                                                    |
| 3. ИПТ > ИПК > ИПУ<br>3. TSI > WQTPI > WBRI                                                                 | $0,023 \times 0,636 + 0,238 \times 0,277 + 0,509 \times 0,086 = 0,124$ | 0,000–0,181<br>0,090<br><b>0,124 (IC)</b>                                       | 0,181–0,349                                                                        | 0,349–0,526                                                                          | 0,526–0,758                                                                           | 0,758–1,000                                                                    |

Также обратим внимание на то, что по сравнению с основным вариантом в варианте с  $\lambda = 0,5$  изменение статуса происходит внутри одного класса, а при  $\lambda = 3,0$  класс статуса озера изменяется. При этом в первом случае статус снижается (примерно на полкласса), а во втором – повышается (примерно на класс).

Анализ таблиц показал, что при малых значениях (0,5; 0,25; 0,1; 0,05; 0,01) параметра  $\lambda$  озеро Волковское попадает в более низкий класс ИПЭС по сравнению с основным вариантом  $\lambda = 1$  (из категории IIIл оз. Волковское переходит в IIIс). При больших значениях параметра  $\lambda$  ( $\lambda = 3$ ) озеро по величине ИПЭС попадает в Ic–IIc классы статуса.

С введением нелинейной связи в рассмотренных вариантах (табл. 4–6) значения ИПЭС изменяются (от 0,083 до 0,184), что в итоге влияет на переход водоема в другой класс (категорию) экологического статуса.

## Заключение

Основным итогом работы стало сравнение результатов интегральной оценки экологического статуса оз. Волковское (Суури), полученных на разных моделях-классификациях при учете использования в нормирующих функциях как линейного представления взаимосвязи параметров с исследуемым свойством системы, так и нелинейного вида этой связи. Варианты сравнений выполнены на уровне количественной оценки субиндексов и итогового значения интегрального показателя экологического статуса водоема (ИПЭС) в реализованных вариантах. Установлено, насколько сильно изменяется значение

субиндекса трофности (ИПТ) с введением нелинейной связи между критериями оценки и индексом трофности. Варианты изменения значений, учитывающих степень нелинейности  $\lambda$ , включали только положительные значения: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 (были учтены также значения 0,01; 0,05; 0,1 и 0,25). Другие возможные значения степенных функций планируется рассмотреть в будущих исследованиях. Эксперименты проводились по упрощенному способу, при котором параметр  $\lambda$  задавался одним значением для всех критериев, входящих в субиндекс ИПТ. Выявлено, что при увеличении показателя степени  $\lambda$  значение ИПТ оз. Волковское также увеличилось (от 0,285 при  $\lambda = 1,0$  до 0,534 при  $\lambda = 1,5$ ). Графически получилась выпуклая вниз функция. Обратный результат получен при увеличении степени  $\lambda$  (ИПТ = 0,152 при  $\lambda = 1,5$ ; ИПТ = 0,081 при  $\lambda = 2,0$ ; ИПТ = 0,023 при  $\lambda = 3,0$ ). Графически получена выпуклость вниз. Следующей задачей было выяснение того, насколько изменится интегральный показатель экологического статуса (ИПЭС) с учетом нелинейности связи в индексе ИПТ и изменении приоритетов (весов) учета субиндекса ИПТ на последнем этапе свертки. При этом в остальных субиндексах была сохранена линейная связь параметров с оцениваемым свойством. В результате исследования выявлено, что изменение параметра  $\lambda$  в сторону уменьшения степени нелинейности дает в итоге сдвиг ИПЭС вправо по оси ЭС: ИПЭС = 0,344 при  $\lambda = 1,0$ , ИПЭС = 0,427 при  $\lambda = 0,5$  для варианта ИПТ = ИПК = ИПУ; ИПЭС = 0,312 при  $\lambda = 1,0$ , ИПЭС = 0,486 при  $\lambda = 0,5$  для варианта ИПТ > ИПК = ИПУ; ИПЭС = 0,291 при  $\lambda = 1,0$ , ИПЭС = 0,449 при  $\lambda = 0,5$  для варианта ИПТ > ИПК > ИПУ.

Наиболее заметные изменения происходят при варианте весов ИПТ > ИПК = ИПУ. При увеличении веса ИПТ отмечено уменьшение значения ИПЭС системы. Для ИПТ = ИПК = ИПУ: при  $\lambda = 1,5$  ИПЭС = 0,300; при  $\lambda = 2,0$  ИПЭС = 0,276; при  $\lambda = 3,0$  ИПЭС = 0,257.

Для варианта ИПТ > ИПК = ИПУ: при  $\lambda = 1,5$  ИПЭС = 0,219; при  $\lambda = 2,0$  ИПЭС = 0,169; при  $\lambda = 3,0$  ИПЭС = 0,128.

Для ИПТ > ИПК > ИПУ: при  $\lambda = 1,5$  ИПЭС = 0,169; при  $\lambda = 2,0$  ИПЭС = 0,161; при  $\lambda = 3,0$  ИПЭС = 0,124.

Опыт, полученный в результате реализованных экспериментов, показывает, что недоучет нелинейности взаимосвязи параметров, выбранных для оценки ИПЭС, даже в случае одного из трех субиндексов (в представленном случае это ИПТ) может занижить оценку ИПЭС при слабо выраженной нелинейности в пределах до половины класса по сравнению с основным вариантом. В случае сильно выраженной нелинейности это может привести к завышению результата оценки ИПЭС в пределах одного класса.

Изменение приоритетов в свертке субиндексов на фоне учета нелинейности может усилить отмеченный выше результат в том случае, если больший вес будет присвоен субиндексу, содержащему учет нелинейности в параметрах оценивания.

## Литература

Александрова Л. В., Васильев В. Ю., Дмитриев В. В., Мякишева Н. В., Огурцов А. Н., Третьяков В. Ю., Хованов Н. В. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. СПб.: СПбГУ, 2000. 275 с. (Депонировано в ВИНТИ № 2342-B00).

Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 280 с.

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

Дмитриев В. В. Оценка состояния и устойчивости наземных и водных геосистем. Учеб.-метод. пособие. СПб.: Медианапир, 2020. 200 с. doi: 10.17513/nr.419

Корников В. В., Хованов Н. В., Юдаева М. С. Многокритериальная классификация в условиях дефицита числовой информации // Труды Карельского научного центра РАН. 2012. № 5. С. 38–43.

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А. Стратиграфия донных отложений озер Карельского перешейка. М.: ГЕОС, 2019. 120 с.

Мякишева Н. В. Многокритериальная классификация озер. СПб.: РГГМУ, 2009. 160 с.

Панютин Н. А., Дмитриев В. В. Моделирование экологического статуса водных объектов // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии: Мат.-лы VII Междунар. науч. конф., посв. 90-летию кафедры географической экологии БГУ (Минск, 11–15 ноября 2024 г.). Минск, 2024. С. 155–159.

Почепко С. Ю., Каспин М. О., Дмитриев В. В. Оценка влияния факторов на экологические функции и продукционно-деструкционные отношения в водной экосистеме // Международный студенческий научный вестник. 2024. № 1. С. 46. doi: 10.17513/msnv.21435

Примаек Е. А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов: Дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2009. 188 с.

Седова С. А., Дмитриев В. В., Четверова А. А. База данных для выявления экологического статуса и факторов массообмена в водной экосистеме на примере озера Суури (LAKE-SUURI-ECOSYSTEM). Патент России RU 2019621679. 2019.

Фрумин Г. Т., Малышева Н. А. Динамика качества воды Псковского озера (2000–2018 гг.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 32–40. doi: 10.17076/lim1133

Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: СПбГУ, 1996. 196 с.

Хованов Н. В. Математические модели риска и неопределенности. СПб.: СПбГУ, 1998. 204 с.

Brousmichea D., Occellia F., Geninb M., Cunya D., Derama A., Lanier C. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables // Ecol. Indic. 2020. Vol. 111. Art. 106023. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.106023

Chessman B. Assessing the conservation value and health of New South Wales rivers: The PBH (Pressure-Biota-Habitat) Project, NSW Department of Land and Water Conservation, Sydney, Australia. 2002.

Dmitriev V., Sedova S., Plenkina A., Khomiakova V., Avdeevich D., Ladanova V., Ukis A., Paniutin N., Makarieva O., Post D. Development of monitoring of water bodies ecological status by the example of small lakes in the North-Western Ladoga region // E3S Web of Conferences. 4<sup>th</sup> Vinogradov conference 'Hydrology: from learning to worldview' in memory of outstanding Russian hydrologist Yury Vinogradov. 2020. Vol. 163. Art. 03002. doi: 10.1051/e3sconf/202016303002

Haskell B. D., Norton B. G., Costanza R. Introduction: What is ecosystem health and why should we worry about it? // Ecosystem Health – New Goals for Environmental Mangement. Washington: Island Press, 1992. 269 p.

Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge // Eur. J. Oper. Res. 2009. Vol. 195(3). P. 857–863. doi: 10.1016/j.ejor.2007.11.018

Meyer J. L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology // J. North Am. Benthol. Soc. 1997. Vol. 16(2). P. 439–447.

## References

Aleksandrova L. V., Vasil'ev V. Yu., Dmitriev V. V., Myakisheva N. V., Ogurtsov A. N., Tret'yakov V. Yu., Khovanov N. V. Multi-criteria geographic and ecological assessment of the condition and sustainability of natural and urbanized systems. St. Petersburg: SPbGU; 2000. 275 p. (Deposited at VINITI under No. 2342-B00) (In Russ.)

Brousmichea D., Occellia F., Geninb M., Cunya D., Derama A., Lanier C. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the

challenge of selecting relevant variables. *Ecol. Indic.* 2020;111:106023. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.106023

Chessman B. Assessing the conservation value and health of New South Wales rivers: The PBH (Pressure-Biota-Habitat) Project, NSW Department of Land and Water Conservation, Sydney, Australia. 2002.

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

Dmitriev V. V. Assessment of the state and sustainability of terrestrial and aquatic geosystems: an educational and methodological manual. St. Petersburg: Mediapapir; 2020. 200 p. (In Russ.) doi: 10.17513/np.419

Dmitriev V., Sedova S., Plenkina A., Khomiakova V., Avdeevich D., Ladanova V., Ukis A., Paniutin N., Markarieva O., Post D. Development of monitoring of water bodies ecological status by the example of small lakes in the North-Western Ladoga region. *E3S Web of Conferences*. 4<sup>th</sup> Vinogradov conference 'Hydrology: from learning to worldview' in memory of outstanding Russian hydrologist Yuri Vinogradov. 2020;163:03002. doi: 10.1051/e3sconf/202016303002

Frumin G. T., Malysheva N. A. Water quality dynamics of Lake Pskov (2000–2018). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;4:32–40. (In Russ.) doi: 10.17076/lim1133

Haskell B. D., Norton B. G., Costanza R. Introduction: What is ecosystem health and why should we worry about it? *Ecosystem Health – New Goals for Environmental Management*. Washington: Island Press; 1992. 269 p.

Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge. *Eur. J. Oper. Res.* 2009;195(3):857–863. doi: 10.1016/j.ejor.2007.11.018

Khovanov N. V. Analysis and synthesis of indicators under the conditions of information deficit. St. Petersburg: SPbGU; 1996. 196 p. (In Russ.)

Khovanov N. V. Mathematical models of risk and uncertainty. St. Petersburg: SPbGU; 1998. 204 p. (In Russ.)

Kornikov V. V., Khovanov N. V., Yudaeva M. S. Multicriteria classification under the conditions of numerical

information deficit. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2012;5:38–43. (In Russ.)

Kuznetsov D. D., Subetto D. A. Stratigraphy of lake sediments of the Karelian Isthmus. Moscow: GEOS; 2019. 120 p. (In Russ.)

Meyer J. L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology. *J. North Am. Benthol. Soc.* 1997;16(2):439–447.

Myakisheva N. V. Multicriteria classification of lakes. St. Petersburg: RGGU; 2009. 160 p. (In Russ.)

Panyutin N. A., Dmitriev V. V. Modeling the ecological status of water bodies. *Sovremennye problemy landshaftovedeniya i geoekologii: Mat-ly VII Mezhdunar. nauch. konf., posv. 90-letiyu kafedry geograficheskoi ekologii BGU (Minsk, 11–15 noyabrya 2024 g.) = Modern problems in landscape science and geoecology: Proceed. VII int. sci. conf. dedicated to the 90<sup>th</sup> anniversary of the Department of Geographic Ecology at Belarusian State University (Minsk, Nov. 11–15, 2024)*. Minsk; 2024. P. 155–159. (In Russ.)

Pochepko S. Yu., Kaspin M. O., Dmitriev V. V. Assessment of the factors impact on ecological functions and production-decomposition relationships in a water ecosystem. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik = International Student Journal*. 2024; 1:46. (In Russ.) doi: 10.17513/msnv.21435

Primak E. A. Integral assessment of the sustainability and ecological well-being of water bodies: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg; 2009. 188 p. (In Russ.)

Sedova S. A., Dmitriev V. V., Chetverova A. A. Database for identifying the ecological status and mass exchange factors in an aquatic ecosystem: a case study of Lake Suuri (LAKE–SUURI–ECOSYSTEM). Russian patent RU 201921679. 2019. (In Russ.)

Vorobeichik E. L., Sadykov O. F., Farafontov M. G. Environmental norming of anthropogenic pollution in terrestrial ecosystems (the local level). Yekaterinburg: UIF «Nauka»; 1994. 280 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 05.09.2025; принята к публикации / accepted: 22.09.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Панютин Николай Алексеевич

аспирант кафедры гидрологии суши  
Института наук о Земле

e-mail: nic9898@yandex.ru

### Дмитриев Василий Васильевич

д-р геогр. наук, профессор кафедры гидрологии суши  
Института наук о Земле

e-mail: v.dmitriev@spbu.ru

### Примак Екатерина Алексеевна

канд. геогр. наук, доцент кафедры прикладной  
и системной экологии

e-mail: primak-rshu@yandex.ru

## CONTRIBUTORS:

### Paniutin, Nikolai

Doctoral Student, Department of Land Hydrology,  
Institute of Earth Sciences

### Dmitriev, Vasily

Dr. Sci. (Geog.), Professor, Department of Land Hydrology,  
Institute of Earth Sciences

### Primak, Ekaterina

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor,  
Department of Applied and Systems Ecology

УДК 556.55:556.5.06+502.51(285):33

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СИСТЕМЫ «ОЗЕРО – ВОДОСБОР» КАК ПРИРОДНОГО КАПИТАЛА

Н. Н. Филатов<sup>\*1</sup>, Ю. Н. Лукина<sup>1</sup>, Н. Е. Галахина<sup>1</sup>, Н. М. Калинкина<sup>1</sup>,  
Е. В. Теканова<sup>1</sup>, Я. П. Молчанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),  
<sup>\*</sup>nfilatov@rambler.ru

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева  
(Миусская пл., 9, Москва, Россия, 125047)

Статья касается вопросов рассмотрения природных ресурсов озер как природного капитала и ключевого компонента устойчивого социально-экономического развития регионов. Дается представление о принятых как в РФ, так и за рубежом подходах к оценке мониторинга водных объектов, методах оценки качества вод, трофического статуса озер, анализируются достоинства и недостатки подходов. Получены оценки ассимиляционной емкости экосистемы Онежского озера. Обосновываются наиболее значимые показатели, характеризующие состояние качества вод, трофический статус экосистем больших озер. Предложен возможный набор основных показателей и моделей, с помощью которых можно оценивать состояние системы «озеро – водосбор» и прогнозировать ее изменения. Дан пример комплексного рассмотрения состояния природной среды для Онежского озера и водосбора. Представлены результаты системного подхода для диагноза и прогнозирования изменений этой системы до 2050 г. при разных климатических сценариях RCP и развитии экономики региона. Разработаны подходы для дальнейшей оценки экосистемных услуг.

Ключевые слова: экосистемы; озера; водосбор; эвтрофирование; ресурсы; ассимиляционный потенциал; модели; прогнозы; природный капитал; экосистемные услуги

Для цитирования: Филатов Н. Н., Лукина Ю. Н., Галахина Н. Е., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Молчанова Я. П. К вопросу оценки состояния и прогнозирования изменений системы «озеро – водосбор» как природного капитала // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 131–150. doi: 10.17076/lim2233

Финансирование. Работа выполнена по договору № E261949-1 ФГАУ «НИИ «ЦЭПП».

**N. N. Filatov<sup>1\*</sup>, Yu. N. Lukina<sup>1</sup>, N. E. Galakhina<sup>1</sup>, N. M. Kalinkina<sup>1</sup>,  
E. V. Tekanova<sup>1</sup>, Ya. P. Molchanova<sup>2</sup>. ON THE QUESTION OF ASSESSING  
THE CURRENT STATE AND PREDICTING CHANGES IN THE LAKE-  
CATCHMENT SYSTEM AS A NATURAL ASSET**

<sup>1</sup>Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*nfilatov@rambler.ru

<sup>2</sup>D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (9 Miusskaya Sq., 125047 Moscow, Russia)

The article substantiates the importance of taking account of the natural resources of lakes as a component of the natural capital and a key factor for sustainable socio-economic development of regions. An example of a comprehensive review of the state of the natural environment is presented through the case of Lake Onego and its catchment area. An overview of the approaches adopted both in the Russian Federation and abroad to assessing and monitoring water bodies, evaluating the water quality and the trophic status of lakes is provided, with a discussion of the strengths and weaknesses of these approaches. The assimilation capacity of Lake Onego ecosystem is estimated. The most significant indicators of water quality and the trophic status of large lake ecosystems are substantiated. A possible set of key indicators and models for assessing the state of the lake-catchment system and predicting its changes is proposed. The results of a systems approach to diagnosing and forecasting changes in the Onego lake-catchment system up to 2050 under different RCP climate and economic development scenarios are presented. Approaches for further assessment of ecosystem services and natural units of Lake Onego and its catchment area have been developed.

**Keywords:** ecosystems; lakes; catchment; eutrophication; resources; assimilation potential; models; forecasts; natural capital; ecosystem services

For citation: Filatov N. N., Lukina Yu. N., Galakhina N. E., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Molchanova Ya. P. On the question of assessing the current state and predicting changes in the lake-catchment system as a natural asset. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 131–150. doi: 10.17076/lim2233

**Funding.** The work was implemented under contract #E261949-1 with Environmental Industrial Policy Center.

## **Введение**

Практика хозяйственной деятельности сталкивается с трудноразрешимым противоречием между экономическими и экологическими приоритетами. Для разрешения противоречий между ними требуется найти возможности изменения системы хозяйствования таким образом, чтобы сохранение и восстановление природы не воспринималось как неизбежные издержки, а стало целью и смыслом экономической деятельности [Скобелев, 2025]. Важнейшие природные экосистемы, в том числе водные, которые являются источниками для жизнедеятельности человека, могут рассматриваться как экологические доноры. Понятие «услуги окружающей среды», впервые предложенное в 1970 г., в 1987 г. было заменено на «экосистемные услуги» (ЭУ), которое более точно отразило значимость экосистемного подхода к природопользованию. В основу этого понятия заложена идея

экономической мотивации ограничения эксплуатации природных экосистем, при этом их сохранение должно стать важным и выгодным. В работе [Constanza, Daly, 1987] введено представление о натуральном капитале в сопоставлении его с банковским, промышленным и информационным капиталами. Согласно данному определению услуги экосистемы представляют собой потоки вещества, энергии и информации от естественных природных капиталов, которые объединяются с услугами производственного и человеческого капиталов, определяя благосостояние человечества. В работах [Costanza et al., 1997; Faber et al., 2006] сформулирована такая область исследования, как «экологическая экономика», ориентированная на решение проблем устойчивого развития и определяющая пути интеграции экологических и экономических теоретико-методологических подходов.

На Международной конференции по водным ресурсам и окружающей среде в г. Дублине

в 1992 г. провозглашен принцип экономической ценности воды и признания ее экономическим благом. В ряд экосистемных услуг водных объектов входят: водоснабжение, рыболовство, использование в целях аквакультуры, рекреации, водного туризма, транспорта, энергетики и пр. При этом позиция экономической науки, постулирующей «затратный» характер оценки экосистемных услуг (например, затраты, связанные с научными исследованиями и мониторингом состояния экосистем, очисткой сточных вод и др.), приводит к недооценке их реальной ценности и является одной из основных причин невыгодной для человечества деградации экосистем [Бобылев, 2025]. Необходимо различать природный капитал, дающий выгоды (доходы), связанные с эксплуатацией (или сохранением) природных благ, и экосистемный капитал [Экосистемные..., 2016], который не учитывает ресурсы полезных ископаемых и абиотические факторы. Экосистемные услуги понимаются как польза, которую человек получает от функционирования природных экосистем. С экономической точки зрения разрушение экосистем и их функций следует рассматривать как потерю основных ресурсных активов. Для сохранения этих активов в мировой практике природопользования внедрялась система платежей, которая заключается не в погашении негативного воздействия потенциальным загрязнителем в соответствии с известным принципом «загрязнитель платит», а в стимулировании улучшения окружающей среды потенциальным загрязнителем, что можно описать словосочетанием «пользователь платит» [Бобылев, 2025].

Ярким примером недооценки значимости экосистемных услуг, природных ресурсов (природного капитала) водоемов является попытка принятия Закона об охране Ладожского и Онежского озер, по примеру уже принятого в 1999 г. Закона об охране озера Байкал. Представленный в 2016 г. на рассмотрение в Госдуму РФ проект Закона об охране озер не был поддержан, так как имел недостаточное экономическое обоснование и мог быть «слишком затратным». Например, вложения средств в виде двух федеральных целевых программ для обеспечения Закона об охране озера Байкал не привели к намеченным целям. В случае, если озера будут продолжать эвтрофироваться, загрязняться, их ресурсы могут в конечном итоге обесцениться и экономические потери на порядки превысят затраты на реализацию правовых актов и целевых программ.

Современное состояние крупных озер свидетельствует о продолжающейся деградации их экосистем во всем мире [Дмитриев и др.,

2010; Jenny et al., 2020]. Причины деградации озер обусловлены возрастающей антропогенной нагрузкой при росте населения, глобальным потеплением климата, несовершенной системой хозяйствования и недостатками управления водным хозяйством.

В современных условиях требуются подходы для объективной оценки состояния и прогноза изменений природных систем с целью их рационального использования и сохранения для будущих поколений. Необходимо обосновать набор показателей для объективной оценки состояния, предложить подходы по усовершенствованию и гармонизации системы наблюдений, мониторинга, выполняемых разными ведомствами, а также совершенствовать методы прогноза изменений водных систем для поддержки принятия управленческих решений. Цель настоящей статьи – представить методы, критерии оценивания состояния и прогнозирования изменений хорошо изученной, контролируемой как государственными органами, так и исследовательскими организациями водной системы «Онежское озеро – водосбор» для дальнейшей оценки экосистемных услуг, природного капитала.

### **Обоснование основных показателей для оценки состояния и прогнозирования системы «озеро – водосбор»**

#### *Об экономической ценности экологических услуг озер*

До недавнего времени ресурсы великих озер не имели экономической оценки и не были учтены в общем балансе национального богатства страны. Как отмечается в работе Д. О. Скобелева [2025], современные механизмы управления экономикой ошибочно перераспределяют ресурсы в сторону сектора финансовых услуг, при этом необходимо выделять природный капитал как ключевой компонент устойчивого социально-экономического развития. Авторы выделяют три составляющие методологического основания комплексной оценки стоимости экосистемных услуг: экологическую – как оценку способности экосистем выполнять свои функции; экономическую, связанную с интеграцией оценки в механизмы принятия решений, и социальную – необходимую для обеспечения согласованных решений общества и снятия противоречий [Costanza et al., 2014]. В работе Н. Л. Болотовой с соавторами [2022] впервые дана ориентировочная экономическая оценка ресурсов Ладожского озера (экосистемных услуг), которая находится в пределах 3,2–24,7 млрд долл./год.

Негативные процессы при антропогенном воздействии в условиях глобального потепления на водную среду снижают ценность ресурсов, изменяя экосистемные функции и создавая угрозы их потерь вследствие эвтрофирования озера, а также поступления загрязняющих веществ техногенного характера. Под влиянием антропогенных и климатических воздействий изменяется пространственная картина распределения продукционных услуг, связанная с влиянием на качество воды трофического статуса в разных частях озера (прибрежной, литоральной, центральной). Так, центральная часть акватории Ладожского озера в последние годы имела слабomezотрофный статус (при олиготрофном характере гипolimниона), северная – олиготрофный, западная – мезотрофный, а южная часть (Свирская и Волховская губы) – слабоэвтрофный [Современное..., 2021]. Похожая ситуация отмечается и для Онежского озера, когда центральная часть озера имеет олиготрофный статус, а Кондопожская губа – альфа-эвтрофный [Калинкина и др., 2023; Филатов и др., 2025]. В этом случае для великих озер России требуется учитывать пространственную неоднородность изучаемого объекта, а для моделирования экосистемы применять математические 3D-модели [Меншуткин и др., 2014]. В работе Н. Л. Болотовой с соавторами [2022] показано, что потенциальная стоимость питьевой воды Ладожского озера составляет около 690 миллиардов рублей в год, при установленном в 2021 г. размере платежа

813,96 руб. за 1,0 тыс. м<sup>3</sup> воды [Ситкина, 2010]. Потенциальные экосистемные услуги Ладожского озера с учетом других экосистемных услуг эквивалентны сумме около 1,6 триллиона рублей. Общая стоимость некоторых уже реализуемых компонентов экосистемных услуг Ладожского озера достигает 4166,7 млн руб./год, включая потребление питьевой воды, развитие аквакультуры, туристические и транспортные услуги. Для Онежского озера такие расчеты еще предстоит сделать, но его экосистемные услуги, по экспертной оценке, могут стоить примерно в 3–4 раза меньше потенциальных экосистемных услуг Ладожского озера. Таким образом, результатом использования понятия «экосистемные услуги» стало признание возможности учета их стоимостной значимости для управленческих решений в сфере природопользования, которые невозможны без определения перечня объективных показателей, которые будут впоследствии приниматься при расчете экономических оценок.

#### *О подходах, применяемых в оценке качества вод и состояния озер*

В настоящее время подходы к оценке качества вод и последствий воздействия антропогенных факторов (эвтрофирование, токсификация) могут быть отнесены к двум категориям (рис. 1): химический контроль – идентификация и количественное определение составляющих (вещества, физические величины);



Рис. 1. Блок-схема методов оценки качества вод водоема [Моисеенко, 2017]

Fig. 1. Block diagram of methods for assessing the quality of water in a reservoir [Moiseenko, 2017]

биологический контроль – оценка воздействия на живые организмы и оценка последующих эффектов на индивидуальном, популяционном уровне и уровне сообщества, основанная на методах биотестирования (информация об относительной токсичности отдельных веществ или элементов) и биоиндикации (информация о состоянии организмов, популяций и сообществ водной экосистемы).

Химический мониторинг, проводимый лицензированными организациями, основан на анализе состава и свойств воды и сравнении с существующими нормативными значениями [Никаноров, Емельянова, 2005], как правило, со значениями предельно допустимых концентраций (ПДК). На основе сопоставления измеренных концентраций отдельных загрязняющих веществ в водном объекте со значениями ПДК принимается решение об ограничении антропогенных нагрузок. Для оценки загрязненности воды используются и относительные величины – кратность превышения ПДК и повторяемость случаев превышения ПДК. До 2002 г. наиболее широко используемым и официально признанным был расчет индекса загрязнения воды (ИЗВ). На смену индексу ИЗВ был введен удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИВЗ), который учитывает частоту и кратность превышения ПДК и может варьировать в водах различной степени загрязненности от 1 до 16. В отличие от ИЗВ расчет УКИВЗ осуществляется с учетом более широкого числа показателей, перечень которых может быть дополнен специфическими загрязняющими веществами, характерными для конкретного водного объекта. Опыт применения методик расчета ИЗВ и УКИВЗ для озер Карелии показал, что они зачастую отражают региональную специфику природных вод, а не их загрязнение [Лозовик, 2015]. На основании ПДК сложно сделать заключение об основных тенденциях антропогенных преобразований качества вод в условиях комплексных нагрузок на водосборы, включая локальные сбросы, неорганизованные стоки и аэротехногенные потоки регионального и трансграничного характера. ПДК не учитывают природные условия водного объекта и эффекты синергизма, антагонизма, суммации. Именно поэтому гидрохимические методы по критерию ПДК не гарантируют адекватного определения вреда, что затрудняет оценку состояния экосистемы и качества водной среды по одним лишь абиотическим параметрам, а нормирование разрешенных сбросов загрязняющих веществ, например, в Ладожское и Онежское озера для снижения нагрузки не является универсальным средством предотвращения

деградации экосистем озер [Современное..., 2021]. Помимо ПДК активно разрабатывались концепции и методы расчета предельно допустимых возможных воздействий (ПДВВ) и предельно допустимых сбросов (ПДС). Последние основываются на гидрологических факторах и способности водных систем к разбавлению и самоочищению до уровня ПДК по отдельным ингредиентам [Никаноров, Емельянова, 2005].

В мировой практике используется индекс качества воды WQI, разработанный национальной организацией по санитарии (США) и включающий 9 параметров: растворенный кислород, коли-индекс, pH, БПК<sub>5</sub>, нитраты, фосфаты, температура, мутность, взвешенные вещества. В Канаде был предложен индекс качества воды CCME WQI [Canadian..., 2004], значения которого могут варьировать от 0 (низкое качество) до 100 (высокое качество). Индексы CCME WQI, рассчитанные для Онежского озера по современным данным химического состава воды, согласуются с его состоянием, оцениваемым по гидрохимическим данным [Galakhina et al., 2022].

Биологический мониторинг – это оценка загрязненности водоема или ухудшения качества воды с использованием водных организмов. Значимость биологического контроля состояния экосистемы исходит из самого понятия «экосистема» [Одум, 1975]. Главной характеристикой экосистемы является наличие устойчивых во времени потоков вещества и энергии между абиотической и биотической частями экосистемы. Поэтому биологические показатели выступают сигнальным «откликом» экосистемы на изменение абиотических условий.

Существуют два основных вида биологического контроля – биотестирование и биоиндикация. Биотестирование – это оценка пригодности природных вод для жизнедеятельности гидробионтов, в том числе при условии влияния на них техногенного фактора; достоинством его является сравнительно быстрое получение информации о токсичности вод. В основе метода – экспериментальное установление концентраций загрязняющих веществ, которые вызывают наиболее значимые и легко определяемые нарушения у водных организмов: смертность, выживаемость, физиологические или патологические нарушения. Пороговое значение, вызывающее видимые отклонения от нормы у наиболее чувствительной группы организмов, принимается как ПДК опасного вещества [Жулидов, Хоружая, 1994]. В качестве биотестов используются организмы различных систематических групп: бактерии, водоросли, беспозвоночные, рыбы.

Биоиндикация – это обнаружение и определение экологически значимых природных и антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов непосредственно в среде их обитания [Ашихмина, 2005]. Биоиндикация направлена на оценку состояния водоемов по индикаторным видам гидробионтов (количественным и функциональным показателям). Текущие изменения состояния экосистем можно отследить на планктонных сообществах (главным образом, одноклеточных организмах), поскольку они первыми реагируют на изменение состояния среды в связи с быстрым обменом веществ. Кумулятивный эффект загрязнения или эвтрофирования хорошо отражает состояние бентосных сообществ, главным образом глубоководных. Состояние ихтиоценозов отражает высокую степень трансформации экосистем, т. к. в случае воздействия токсичного фактора многолетний жизненный цикл рыб способствует аккумулярованию токсикантов. В случае эвтрофирования меняется структура ихтиоценозов с тенденцией к измельчанию, повышению продуктивности ихтиофауны. Изменяется видовой состав, возрастает доля эврибионтных видов, что снижает промысловую ценность ихтиоценозов. Подходы к оценке состояния водных экосистем на основе биоиндикации хорошо разработаны и их можно разделить на несколько категорий.

Система оценки трофического статуса. Проблемой глобального масштаба в конце XX в. стало антропогенное эвтрофирование, которое приводит к вторичному загрязнению, деградации и потере ресурсной ценности пресноводных экосистем. Исходя из определений процесса эвтрофирования, оценка трофности должна проводиться по совокупности показателей, характеризующих продукцию органического вещества в водоеме. В системе оценки трофического статуса ключевыми являются трофические шкалы и индексы. Современная концепция трофии базируется на принципе биологической продуктивности, по уровню которого приняты три основных состояния водоема – олиготрофное, мезотрофное, эвтрофное с разной степенью их детализации [Rodhe, 1967; Винберг, 1974; Бульон, 1983]. Уровень биологической продуктивности озер всегда связан с определенными лимнологическими параметрами, характером водосбора, особенностями гидрографической сети и другими компонентами, объединенными в общую систему как внутри водоема, так и в системе «водосбор – озеро». Поэтому определение трофического статуса водоема может включать использование нескольких показателей, среди которых

наиболее информативными являются *первичная продукция, хлорофилл а и общий фосфор*, на основе которых рассчитываются индексы трофического состояния.

Индексы трофического состояния поверхностных вод можно разделить на две группы. К первой группе относятся индексы, основанные на математической интерполяции коррелирующих значений традиционных биотических и абиотических показателей. Ко второй группе относятся индексы, характеризующие структуру биоценозов: индексы сравнения, видового обилия и видового разнообразия. Наиболее распространенные индексы, применяемые для озер [Неверова-Дзюпак, Цветкова, 2020]: *трофического состояния (TSI)*, разработанный Карлсоном [Carlson, 1977]; *оценки эвтрофирования озер (LEI)*; индекс *трофического состояния (ИТС)*, предложенный В. В. Бульоном [1983]; *трофический индекс (TRIX)* [Vollenweider et al., 1982] и ряд других. Критерии трофии являются основными при оценке водоемов в условиях биогенного загрязнения, провоцирующего эвтрофирование. Детально разработаны трофические шкалы для водоемов средних и северных широт [Китаев, 2007], а для водоемов Карелии с учетом гумусности с повышенной цветностью воды (рис. 2) [Лозовик, 2015] критерии уровня трофии развиваются и детализируются с учетом региональной специфики (рис. 2).

Система сапробности позволяет классифицировать водоем по наличию и количеству организмов-индикаторов, чувствительных к органическому загрязнению воды (ксеносапробная, олигосапробная, мезосапробная, полисапробная) [Rodhe, 1967]. Дополнительно для оценки качества воды используются микробиологические показатели: обнаружение и определение количества водных бактерий, адаптированных к потреблению легкоминерализуемого органического вещества, нефтепродуктов и фенольных соединений.

#### *О подходах к организации и ведению мониторинга водных объектов*

В Российской Федерации управленческие функции, связанные с мониторингом водных объектов, распределены между большим количеством административных органов, что делает координацию работ по реализации мониторинга разными ведомствами трудной задачей. В связи с этим для понимания процессов, происходящих в водных экосистемах, требуется организация интегрированного мониторинга водоема и водосбора, что важно для решения



Рис. 2. Распределение  $P_{общ}$  по классам трофности с учетом гумусности воды [Лозовик, 2013]  
 Fig. 2. Distribution of  $P_{total}$  by trophic classes taking into account the humus content of the water [Lozovik, 2013]

задач управления ресурсами озер и сохранения их экосистем. Кроме того, система мониторинга водных объектов региона существует относительно обособленно от системы мониторинга показателей социально-экономического развития территории [Данилов-Данильян, 2015]. Для системы «водоем – водосбор» должен реализовываться принцип интегрированного управления, который предусматривает применение системного подхода. С помощью автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) осуществляется обеспечение процедуры управления ресурсами озер, сохранения их экосистем и влияние на хозяйственную деятельность на водосборе.

#### О государственном мониторинге водных объектов

В системе Росгидромета разработан обширный арсенал средств для оценки качества воды и экологического состояния водных объектов по широкому спектру показателей. Одним из основных средств для организации и проведения МВО являются руководящие документы (РД). Отметим несколько важных для настоящей работы. Это РД 52.24.309-2016, регламентирующий состав измерений, расположение станций, частоту отбора проб и другие характеристики. В нем декларируются следующие основные принципы организации системы наблюдений: комплексность и систематичность наблюдений; согласованность сроков их проведения с характерными фазами гидрологического режима водных объектов; определение состава и свойств воды едиными или сопоставимыми методиками. РД 52.24.620-2000 представляет методику оценки уровня антропогенного эвтрофирования пресноводных

экосистем по приоритетным показателям перестройки структурной организации фитопланктонных сообществ при усилении антропогенного воздействия. РД 52.24.635-2002 включает характеристику сапробности; параметры токсичности воды и донных отложений; РД 52.24.309-2004, по которому оценивают класс качества воды по характеристикам планктонных сообществ, макрозообентоса и микробиологическим показателям, содержит характеристики состояния и параметры развития водных сообществ, характеристики трофического статуса (трофности) водного объекта (состояние фитопланктона, площадь «цветения», содержание хлорофилла а).

Специальный документ разработан с целью гармонизации Российской системы мониторинга водных объектов с мониторингом, реализуемым Директивой Европейского Союза – РД 52.24.763-2012. Европейская Рамочная директива (Water Framework Directive – WFD), принятая Европейским парламентом в 2000 г., стала существенным толчком к развитию и совершенствованию методов мониторинга [Directive..., 2000]. WFD и тесно связанная с ней информационная сеть EuroWaterNet образуют статистически стратифицированную систему унифицированных стандартов, приспособленную для решения конкретных задач охраны, использования и управления водными ресурсами. Директива определяет развитие и совершенствование систем биоиндикации в странах ЕС. Согласно WFD вводится специальная процедура создания интеркалибровочной сети объектов стран ЕС для оценки биологического состояния водных объектов каждого типа в соответствии с утвержденным реестром и тщательный выбор эталонных створов или целых водных объектов; учет региональных особенностей. Несмотря на значительное число РД в РФ,

посвященных оценке качества воды и состояния водных объектов, в них есть ряд недостатков, среди которых: отсутствие официально утвержденных региональных ПДК; отсутствие ПДК для таких важнейших биогенных веществ, как общий фосфор ( $P_{\text{общ}}$ ) и общий азот ( $N_{\text{общ}}$ ), определяющих процесс эвтрофирования большинства пресноводных водоемов.

К значительным недостаткам существующей системы мониторинга Росгидромета на Ладожском и Онежском озерах могут быть отнесены следующие факторы: отсутствие регулярных наблюдений за гидробиологическими и токсикологическими характеристиками воды, донных отложений; неполнота программы гидрохимического мониторинга; существенное сокращение сети станций наблюдений на озерах. Отметим, что в последние примерно 20 лет из-за отсутствия собственного флота подразделениями Росгидромета не проводятся наблюдения на акватории Онежского озера. Важным фактором является трудная сопоставимость методик наблюдений (сроков, горизонтов, створов), аналитических методов в Росгидромете и организациях Минобрнауки РФ, которые проводят исследования на озерах. В ИВПС КарНЦ РАН в 2022–2024 гг. впервые проведено сопоставление информации о сезонном содержании биогенных элементов в основных притоках Онежского озера – реках Шуя и Водла, полученных ИВПС и КарЦГМС с 1980 по 2022 гг. [Галахина, Зобков, 2024]. При этом данные за 1980–1994 гг. пришлось исключить из рассмотрения, так как они выполнялись по разным методикам. В результате корректировки и объединения данных двух организаций для Онежского озера были впервые реконструированы ряды содержания фосфора и азотсодержащих веществ в реках Шуя и Водла за 1995–2022 гг. Для оценки вклада точечных источников в формирование биогенной нагрузки на озеро используются доступные данные статистических форм 2-ТП (водхоз), которые, к сожалению, оказались ненадежными для анализа баланса поступления биогенных веществ от разных источников [Лозовик и др., 2016; Литвинова и др., 2021].

### *Экологический мониторинг*

Теоретической основой экологического мониторинга<sup>1</sup> является экосистемный подход, то есть оценка структуры и функционирования экосистемы, включая круговорот веществ, пищевые и конкурентные отношения, видовое

разнообразие сообществ, динамику численности популяций [Абакумов, Сущеня, 1991]. Поэтому именно биологическим методам доступна оценка последствий загрязнения по степени нарушенности водной экосистемы [Винберг, 1974; Абакумов, Сущеня, 1991]. Известно, что не существует единого универсального критерия по отношению к оценке разнообразных антропогенных воздействий. Например, для оценки эвтрофирования водоемов наиболее информативным индикатором является фитопланктон, для определения закисления вод информативен зообентос, а для оценки токсичного загрязнения – организм рыб. Итоговая экспертная характеристика экологического состояния водного объекта основывается на общей сумме всех признаков/критериев, включая структурные (видовой состав, численность, биоразнообразие, соотношение видов различной экологической валентности, характеристики их сапробности) и функциональные характеристики водных сообществ (показатели продукции, деструкции и др.). При этом система критериев интегральной оценки экологического состояния должна отвечать следующим требованиям: отражать специфику загрязнения; включать наиболее чувствительные индикаторы; учитывать способность экосистемы к восстановлению после нарушений/«возмущений» [Моисеенко, 2017].

### *Гидробиологические показатели для оценки состояния экосистемы Онежского озера*

Низкая минерализация, повышенная цветность воды Онежского озера, малая доступность фосфора в сочетании с низкой среднегодовой температурой воды влияют на слабую метаболическую активность и невысокий уровень развития водных сообществ и определяют слабые самоочистительные возможности водной экосистемы. В результате избыточного поступления минеральных, биогенных, органических и взвешенных веществ изменяется гидрохимический режим, прогрессируют процессы эвтрофирования, что является причиной ухудшения качества воды. Особую тревогу вызывает состояние северо-западных заливов Онежского озера (Кондопожская и Петрозаводская губы), длительное время испытывающих воздействие коммунально-промышленных центров и рыбоводных предприятий. При этом зона накопления загрязняющих и биогенных веществ расширяется, распространяясь на сопредельные глубоководные участки Большого и Центрального Онего. На современном этапе озерного генезиса экосистемы Онежского

<sup>1</sup> Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 26.12.2024) «Об охране окружающей среды».

озера и озерно-речных систем его водосборной территории функционируют в условиях антропогенного воздействия и климатической изменчивости, интенсивность которых определяет основные тенденции их изменений и может стать причиной снижения как природной, так и экономической ценности водоемов [Диагноз..., 2020].

Кондопожская губа представляет наиболее проблемный район Онежского озера с точки зрения комплексного воздействия от точечных источников (городские стоки), диффузного стока с водосбора, сточных вод целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) и форелевых хозяйств, которые являются поставщиками минерального фосфора, органических и взвешенных веществ, провоцирующих эвтрофирование [Крупнейшие..., 2015; Калинкина и др., 2021; Галахина, Зобков, 2024]. Воды р. Суны – дополнительный источник пополнения фосфором Кондопожской губы. Подобная интенсивная фосфорная нагрузка приводит к формированию сильного дефицита кислорода и к высоким концентрациям минерального фосфора (787 мкг/л) в придонных слоях [Галахина, Зобков, 2024]; наблюдаются процессы вторичного загрязнения водной среды фосфором из донных отложений, что определяет серьезные изменения в структуре бентосных сообществ и развитие цианобактерий. Выделим наиболее важные характеристики для определения базовых показателей и подходов для гидробиологического мониторинга состояния Онежского озера.

Фитопланктон, являясь начальным звеном трофической сети и непосредственным потребителем фосфора, первым реагирует на биогенное загрязнение. Высокая скорость оборота биомассы одноклеточных водорослей способствует быстрой реакции на изменение концентраций биогенных веществ, отражая текущую ситуацию на водоеме. *Хлорофилл а* – важнейший показатель для оперативной оценки количества фитопланктона и его функциональной активности. Первичная продукция (РР), являющаяся прямым показателем роста и активности фитопланктона, хорошо зарекомендовала себя в долгосрочных исследованиях [Бульон, 1983]. Для Онежского озера показатель хлорофилла *а* и РР успешно апробирован при моделировании продуктивности экосистемы озера [Isaev et al., 2022], и имеется возможность определения хлорофилла *а* по данным дистанционных измерений [Баклагин, 2023].

Численность цианобактерий служит важнейшим показателем текущего состояния экосистемы, поскольку среди них существуют

виды, способные к выделению цианотоксинов – сильнейших растительных ядов. В Онежском озере отмечается цветение цианобактерий в северной части большого олиготрофного озера [Теканова и др., 2023]. В условиях летней изоляции гипolimниона в глубоких озерах могут формироваться зоны «напряжения», связанные с накоплением на дне органического вещества, синтезированного в верхних слоях воды, а также органического вещества техногенного происхождения.

Бентос отражает кумулятивные эффекты загрязнения водоемов. Биогенное загрязнение, накопление органического вещества в донных отложениях и доступных кормовых ресурсов в виде осевшего фитопланктона и детрита на дне приводит к увеличению продуктивности и, в конечном итоге, к увеличению биомассы бентоса, изменению структуры бентосного сообщества. *Амфиподно-олигохетный индекс* применяется для оценки степени изменения донной системы Онежского озера в процессе эвтрофирования. Он выражается как соотношение численности основных групп бентоса: амфипод (чувствительные оксифильные реликтовые рачки *Monoporeia affinis*) и малощетинковых червей, устойчивых к загрязнению. Кроме того, *Monoporeia affinis* является основным кормовым объектом ценных видов рыб (сигов), поэтому его элиминация из состава сообщества будет оказывать влияние на структуру ихтиоценозов и уловов, снижение рыбохозяйственного значения водоема.

Рыбы – важнейшие индикаторы токсигенного загрязнения водных объектов [Моисеенко, 2017]. Для исследований рыб используются морфологические, физиологические, гистологические, гематологические, биохимические, репродуктивные и эндокринные параметры, позволяющие выявить как кратковременные эффекты, так и продолжительное действие сублетальных доз загрязняющих веществ. Патологические изменения в организме рыб позволяют определить степень токсичности водной среды, оценить кумулятивные эффекты, а также сформировать представление о потенциальной опасности веществ для человека [Livingstone, 2003].

### **Фенологический подход к оценке состояния экосистемы Онежского озера**

Фенологический подход исследования заключается в идентификации сроков фенофаз на основе изучения сезонных сукцессий планктонного сообщества, определяемых температурным режимом озера, световым режимом и динамикой трофического ресурса.

Для Онежского озера фенологический подход впервые разработан и опробован на зоопланктоне, в сезонном развитии которого выделены четыре фенофазы, различающиеся структурой сообщества. Разработанные подходы были применены к анализу сезонного цикла первичной продукции, который показал, что ее динамика в открытом плесе озера синхронизирована с цикличностью температуры воды, хлорофилла *a* и недиатомового фитопланктона. В противофазе с этими параметрами происходит развитие диатомовых водорослей [Теканова и др., 2023].

### Об ассимиляционном потенциале озер

Ассимиляционный потенциал (АП) природной среды [Гусев и др., 1997] – это самовосстановительная способность по отношению к поступлению в природную среду вещества и энергии в результате хозяйственной деятельности. АП является свойством экологических систем, в том числе и экосистем озер, «сопротивляться» внешним воздействиям. В зарубежной литературе есть термин «*carrying capacity of environment*», который переводится как «пропускная способность окружающей природной среды» [Arrow et al., 1995]. Термин был введен в связи с обсуждением проблем взаимосвязи между экономическим ростом и качеством природной среды. АП как ограниченный природный ресурс нуждается в экономической оценке. В работах [Руховец и др., 2007; Астраханцев и др., 2015] получены количественные и экономические оценки АП для Ладожского и Онежского озер в условиях влияния глобального потепления и изменений антропогенной нагрузки. В виде количественной оценки АП предложено принять систему лимитов (по ингредиентам) на объемы сброса загрязняющих веществ и биогенов (ЗВ и Б), соблюдение которых сохраняет устойчивость водных экосистем озер. В вычислительных экспериментах [Руховец и др., 2007; Руховец, Филатов, 2014] получены оценки АП по сбросу биогенов, при которых озеро сохраняет свой трофический статус: для Ладожского озера оценка АП по сбросу фосфора – 2500 т  $P_{\text{общ}}/\text{год}$ ; для Онежского – 800 т  $P_{\text{общ}}/\text{год}$  и по сбросу азота – 15 000 т  $N_{\text{общ}}/\text{год}$ . В этих работах показано, что по крайней мере до 2010 г. изменения климата на водосборе Ладожского и Онежского озер не вносили заметных изменений в функционирование экосистем озер, и поэтому АП экосистемы сохранился. Полученные оценки могут быть использованы как начальные значения, например, для рыночного механизма распределения квот на сбросы.

### К выбору показателей для интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор»

В 1999 г. представителями нескольких стран в рамках международного гранта ТАСИС был разработан Проект интегрированной программы природоохранного мониторинга для Ладожского озера, который учитывал опыт организации и проведения мониторинга и управления ресурсами озер как в России, так и в странах ЕС и Северной Америки [Вильянен и др., 1999]. Интегрированный мониторинг системы «водоем – водосбор» осуществляется путем комбинации геофизических, химических и биологических наблюдений с использованием разнообразных математических моделей для прогнозов [Дмитриев и др., 2010]. В разнообразных руководящих документах Росгидромета (РД) определены физические, химические, биологические и экотоксикологические показатели/индикаторы, которые дают возможность характеризовать качество воды, трофический статус и другие параметры водоема. В работе [Вильянен и др., 1999] специально для Ладожского озера предложен набор параметров для осуществления мониторинга, обосновано расположение станций и регулярность наблюдений как контактными, так и дистанционными методами. Для оценки состояния и изменений экосистемы, прогностических расчетов, необходимых для принятия решений, предложены разнообразные математические модели для описания озерных гидрофизических и химико-биологических процессов, а также водного стока и стока биогенных веществ с водосбора. Однако предложенные разработки интегрированного мониторинга Ладожского озера и водосбора так и не были реализованы [Современное..., 2021].

На основе опыта многолетних экспериментальных исследований экосистемы озера, проводимых подразделениями Росгидромета и ИВПС КарНЦ РАН для реализации интегрированного мониторинга озера и водосбора, решения разнообразных проблем с оценкой влияния городских стоков, форелевых хозяйств и др., предлагается оптимальный набор параметров (табл.).

Схемы станций измерений для комплексных наблюдений, мониторинга Онежского озера для разных сезонов года представлены на рис. 3. Выбор станций наблюдений мониторинга зависит также от поставленных практических задач, с учетом особенностей гидрологического режима в разные сезоны и расположения источников биогенной нагрузки.

Основные параметры для ведения интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор» с целью решения разнообразного комплекса задач

Key parameters for integrated monitoring the Lake Onego – catchment system to address a diverse range of issues

| Данные<br>Data                                                                                                                                                                                      | Параметры<br>Parameters                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Климатические метеоданные<br>Climatic and meteorological                                                                                                                                            | Т° воздуха, осадки, испарение. Данные реанализа<br>Air t°, precipitation, evaporation. Reanalysis data                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Гидрологические<br>Hydrological                                                                                                                                                                     | Сток рек, температура поверхности воды (ТПВ), спутниковые данные: ТПВ, Chl a, DOM<br>River runoff, water surface temperature (WST), satellite data: WST, Chl a, DOM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Определение нагрузки (реки)<br>Chemical load (rivers)                                                                                                                                               | Р <sub>общ</sub> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , растворенный Р <sub>общ</sub> , растворенный Р <sub>неорг</sub> , N <sub>общ</sub> , pH, взвеси, цветность, бихроматная и перманганатная окисляемость, БПК <sub>20</sub> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> , электропроводность, фенолы, нефтяные углеводороды, Fe, Al, Mn, Cu, Pb, Cr, Cd, Zn, Hg<br>Total phosphorus (TP), PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , dissolved TP, dissolved inorganic phosphorus (IP), Total nitrogen (TN), pH, suspended solids, color, COD <sub>Cr</sub> , COD <sub>Mn</sub> , BOD <sub>20</sub> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> , conductivity, phenols, petroleum hydrocarbons, Fe, Al, Mn, Cu, Pb, Cr, Cd, Zn, Hg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Определение нагрузки с водосбора от сельхозпредприятий<br>Load from agricultural complex on the catchment                                                                                           | Вынос биогенных элементов с учетом доз внесения удобрений и выноса азота и фосфора с урожая и в зависимости от типов почв на территории водосбора сельхозпредприятий<br>Removal of nutrients taking into account the rates of fertilizers application and the removal of nitrogen and phosphorus with the harvest and depending on the soil types in the catchment area of agricultural enterprises                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Характеристика подстилающей поверхности, формирующей рассредоточенный вынос БЭ с водосбора<br>Characteristics of the underlying surface causing dispersed discharge of nutrients from the catchment | Спутниковые данные – коллекция CGLS-LC100, основана на спутниковых данных PROBA-V, Sentinel-2, Landsat 7, 8<br>Satellite data collection CGLS-LC100 is based on satellite data PROBA-V, Sentinel-2, Landsat 7, 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Определение нагрузки от точечных (2-ТП (водхоз)) и рассеянных (форелевые хозяйства) источников<br>Load from the point sources (waste water) and diffuse sources (trout farms)                       | Биогенные элементы (P-PO <sub>4</sub> , Р <sub>общ</sub> , N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N-NO <sub>3</sub> , N <sub>общ</sub> ). Расчетная нагрузка биогенных веществ и легкоминерализуемого органического вещества на основе данных о мощности (количестве продукции) хозяйств аквакультуры на водосборе и в Онежском озере (т/год)<br>Nutrients (P-PO <sub>4</sub> , TP, N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N-NO <sub>3</sub> , TN). Estimated load of nutrients and organic matter is based on the data on the capacity (quantity of production) of aquaculture farms on Lake Onego and its catchment area (in tons per year)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Атмосферная нагрузка<br>Atmospheric load                                                                                                                                                            | P-PO <sub>4</sub> , N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>3</sub> , Р <sub>общ</sub> , N <sub>общ</sub> , Cu, Zn, Pb и др. тяжелые металлы. Толщина и плотность снегового покрова для вычисления его водного эквивалента<br>P-PO <sub>4</sub> , N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>3</sub> , TP, TN, Cu, Zn, Pb and other heavy metals. Thickness and density of snow cover for calculating its water equivalent                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Внутренняя нагрузка. Донные отложения<br>Internal load from sediments                                                                                                                               | Влажные седименты: t°, pH, содержание воды, пористость и удельный вес сухого остатка, гранулометрический состав: твердая фаза – потери при прокаливании, Р <sub>общ</sub> , P-PO <sub>4</sub> , N <sub>общ</sub> , металлы; поровые воды: растворенный Р <sub>общ</sub> , растворенный Р <sub>неорг</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , N <sub>общ</sub> , металлы; придонная вода: t°, O <sub>2</sub> , pH, растворенный Р <sub>общ</sub> , растворенный Р <sub>неорг</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , N <sub>общ</sub> , металлы<br>Wet sediments: t°, pH, water content, porosity and specific gravity of dry residue, particle size distribution; solid phase: loss on ignition, TP, P-PO <sub>4</sub> , TN, metals; pore water: dissolved TP, dissolved IP, N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N-NO <sub>3</sub> , TN, metals; bottom water: t°, O <sub>2</sub> , pH, dissolved TP, dissolved IP, N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N-NO <sub>3</sub> , TN, metals                                                                                                                                                                                                               |
| Гидрохимические данные (вода)<br>Hydrochemical data (water)                                                                                                                                         | pH, O <sub>2</sub> , цветность, электропроводность, взвеси (общая мутность и органические компоненты), SiO <sub>2</sub> , общие (Р <sub>общ</sub> и N <sub>общ</sub> ) и растворенные (Р <sub>общ</sub> растворенный, P-PO <sub>4</sub> , N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N-NO <sub>3</sub> ) биогены, органическое вещество (бихроматная и перманганатная окисляемость, БПК <sub>5</sub> и БПК <sub>20</sub> ), основные ионы (Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> ), металлы (Fe, Al, Mn, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn, Hg), фенолы, нефтяные углеводороды, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub><br>pH, O <sub>2</sub> , color, conductivity, total suspended solids (total turbidity and organic components), SiO <sub>2</sub> , total (TP and TN) and dissolved (TP, P-PO <sub>4</sub> , N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N-NO <sub>3</sub> ) nutrients, organic matter (COD <sub>Cr</sub> , COD <sub>Mn</sub> , BOD <sub>5</sub> and BOD <sub>20</sub> ), main ions (Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> ), metals (Fe, Al, Mn, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn, Hg), phenols, petroleum hydrocarbons |
| Бактериопланктон<br>Bacterioplankton                                                                                                                                                                | Общая численность бактерий и бактерий, растущих на РПА; бактериальная продукция, деструкция<br>Total bacteria abundance, saprophytic bacteria, bacterial production, destruction of organic matter by bacteria                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Фитопланктон<br>Phytoplankton                                                                                                                                                                       | Численность, биомасса, видовой состав, структура сообществ, доля цианобактерий в общей численности фитопланктона, концентрация Chl a, первичная продукция<br>Abundance, biomass, species composition, community structure of phytoplankton, proportion of cyanobacteria in total phytoplankton abundance, Chl a concentration, primary production                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

Окончание табл.  
Table (continued)

| Данные<br>Data                                                                            | Параметры<br>Parameters                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Зоопланктон<br>Zooplankton                                                                | Численность и биомасса, видовой состав, структура сообщества<br>Abundance and biomass, species composition, community structure of zooplankton                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Макро- и мейобентос<br>Macro- and meiobenthos                                             | Численность и биомасса, видовой состав и структура биоценозов, амфиодно-олигохетный индекс, доля реликтовых ракообразных в общей численности глубоководного макрозообентоса<br>Abundance and biomass, species composition and community structure of deep-water macrozoobenthos, amphipoda- oligochaeta index, proportion of relict crustaceans in the total abundance of deep-water macrozoobenthos                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Макрофиты<br>Macrophytes                                                                  | Видовой состав, структура сообществ (высота, ярусность, плотность, процент покрытия), фенологическая фаза, жизненность, выедание животными, площади растительных ассоциаций, биомасса и продукция макрофитов<br>Species composition, community structure (height, layering, density, percent cover), phenological phase, vitality, grazing by animals, area of plant associations, biomass and production of macrophytes                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Перифитон<br>Periphyton                                                                   | Видовой состав, численность клеток, биомасса, концентрация Chl <i>a</i> , первичная продукция<br>Species composition of periphyton, cell number, biomass, Chl <i>a</i> concentration, primary production                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Палеолимнология и химия донных отложений<br>Paleolimnology and bottom sediments chemistry | 1) Определение редокс-потенциала, pH, электропроводности, пористости, размера зерен, сухой вес, содержание органического вещества; 2) датировки по Pb-210 стратиграфии; 3) химический стратиграфический анализ: P, Si, N, тяжелые металлы, органические загрязнители; 4) биостратиграфический анализ диатомовых и головных капсул хирономид<br>1) determination of redox potential, pH, electrical conductivity, porosity, grain size, dry weight, and organic matter content; 2) stratigraphic dating using Pb-210; 3) chemical stratigraphic analysis: P, Si, N, heavy metals, and organic pollutants; 4) biostratigraphic analysis of diatoms and chironomid head capsules |
| Экотоксикология<br>Ecotoxicology                                                          | Биотестирование токсичности сточных вод, природных вод и донных отложений. Тест-объекты (ветвистоусые ракообразные, простейшие)<br>Biotesting of wastewater, natural water, and bottom sediment toxicity. Test organisms (cladocerans, protozoa)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Ихтиопатология<br>Ichthyopathology                                                        | Гематологические показатели (лейкоцитарная формула), биохимические показатели (малоновый диальдегид, супероксиддисмутаза, глутатион S-трансфераза, окислительная модификация белков), гистопатологические индикаторы (печень, жабры, почка)<br>Hematological parameters (white blood cell count), biochemical parameters (malondialdehyde, superoxide dismutase, glutathione S-transferase, oxidative modification of proteins), histopathological indicators (liver, gills, kidney)                                                                                                                                                                                          |

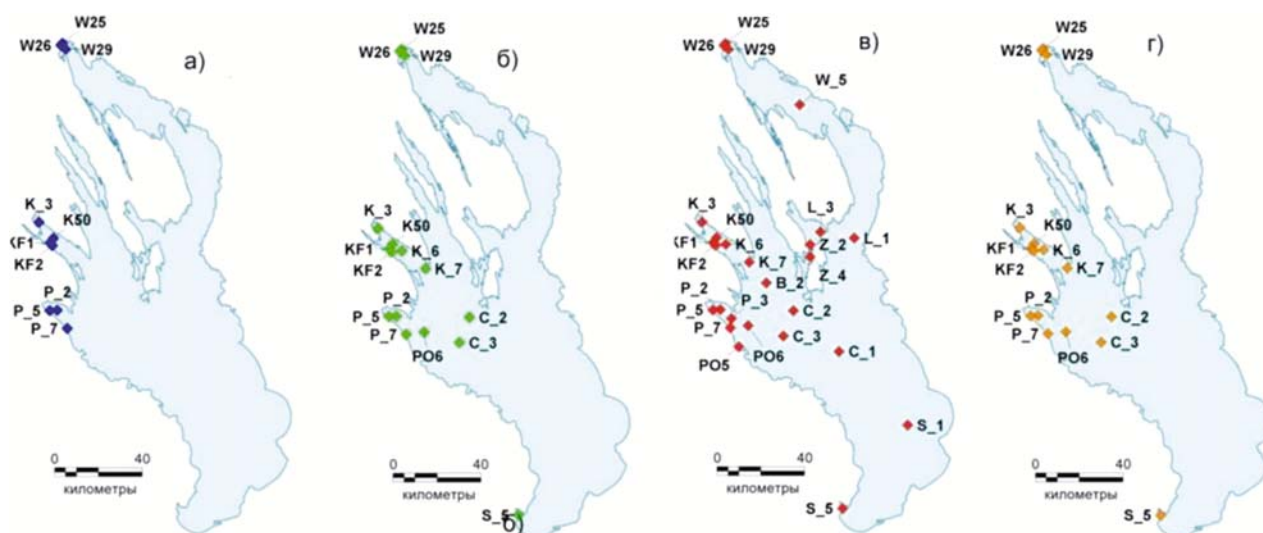


Рис. 3. Схемы станций комплексных наблюдений, мониторинга Онежского озера для разных сезонов года: а) зима, б) весна, в) лето, г) осень

Fig. 3. Layouts of the integrated observation stations for monitoring Lake Onega for different seasons: а) winter, б) spring, в) summer, г) autumn

## О разработке интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор»

Для управления ресурсами крупных водоемов России и сохранения их экосистем необходимо количественно оценить происходящие процессы в озере и на водосборе, предложить прогнозы изменений экосистемы озера и водосбора при разных сценариях изменений климата и антропогенных воздействий. Для этого на примере Онежского озера был фактически реализован так называемый «интегрированный мониторинг» Онежского озера и водосбора. Он включал в себя создание информационно-аналитической системы (ИАС), разработку моделей для оценки поступления водного и биогенного стока с водосбора [Кондратьев и др., 2024], создание 3D-моделей экосистемы озера высокого разрешения с пространственным шагом 1 км для «разрешения» гидрофизических и химико-биологических процессов, происходящих в достаточно узких губах, заливах [Isaev et al., 2022]. Разработанная система интегрированного мониторинга необходима для поддержки принятия управленческих решений [Филатов и др., 2024]. Был использован опыт разработки таких систем для озер России [Меншуткин и др., 2014], Балтийского моря и водосбора [Wulff et al., 2013], а также Великих Американских озер и их водосборов. Для совершенствования системы поддержки принятия управленческих решений для Великих Американских озер разрабатывается интегрированный мониторинг с применением так называемого адаптивного управления [Arhonditsis et al., 2019]. Концепция адаптивного управления разработана из-за признания ограничений возможностей математических моделей при прогнозировании поведения экосистем, на основе которых предпринимаются практические действия по управлению ресурсами и экосистемой озера Эри [Stow et al., 2022]. Интегрированный мониторинг и адаптивное управление обычно включают установление соответствующих показателей и шкал для обнаружения изменений в экологических системах, совершенствование программ мониторинга. Таким образом, устраняются пробелы в знаниях, что позволяет планировать будущие исследования на основе растущего понимания экосистемных процессов. В рамках данного подхода необходимо применять математические модели, соответствующие сложности изучаемой системы «водоем – водосбор». В работе [Stow et al., 2022] показано, что использование не соответствующих сложности экосистемы математических моде-

лей может привести к ошибочным выводам при принятии управленческих решений. Например, в статье [Hellweger et al., 2022] представлены результаты, которые были сделаны с использованием простой боксовой модели для такого крупного водоема, как озеро Эри. На этой основе получены ошибочные выводы, противоречащие расчетам на сложном комплексе верифицированных моделей экосистемы озера.

Интегрированный подход применен в ИВПС КарНЦ РАН на примере системы «Онежское озеро – водосбор» с учетом бассейнового принципа<sup>1</sup> [Филатов и др., 2025]. По результатам многолетних наблюдений создана база данных, оценен комплекс антропогенных и природных факторов с учетом их совместного кумулятивного эффекта как в сезонном, так и в многолетнем масштабе времени и разработаны прогнозы изменения водного и биогенного стока с водосбора в озеро при двух сценариях изменений климата и нескольких сценариях антропогенной нагрузки [Кондратьев и др., 2024; Филатов и др., 2025]. Для оценки антропогенной нагрузки на водосбор и озера рассмотрена социально-экономическая ситуация в шести регионах, входящих в водосбор Онежского озера [Онежское..., 2010; Дружинин, 2023]. Получены оценки возможных изменений экономики и социальной сферы по двум сценариям развития регионов до 2050 г. – «инерционного» и «ускоренного» развития, которые отразятся на особенностях влияния экономики на окружающую среду [Дружинин, 2023]. Выполнены расчеты возможной биогенной нагрузки от точечных и распределенных источников, под влиянием изменений климата и антропогенных воздействий (социально-экономической ситуации) на водосборе озера [Кондратьев и др., 2024]. Установлено, что речной биогенный сток является одним из основных факторов, воздействующих на биопродукционный потенциал водоема и определяющих его трофический статус. Для уменьшения поступления соединений фосфора, азота, взвешенных веществ, биологически окисляемых органических соединений и химически окисляемых органических соединений может быть полезным внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) на расположенных на водосборе озера предприятиях ресурсоемких отраслей, с разработкой и реализацией программ повышения экологической эффективности (ППЭЭ) [Скобелев, 2022]. В качестве примера отметим внедрение

<sup>1</sup> Государственный экологический мониторинг (государственный мониторинг окружающей среды) (в ред. Федерального закона от 21.11.2011 № 331-ФЗ).

на Петрозаводском водоканале ППЭЭ, направленной на снижение концентраций биогенных элементов и достижение соответствия требованиям НДТ [Волков и др., 2020].

Водный сток с водосбора оценен с использованием модели ILLM и выноса растворенных химических веществ с водосбора по модели ILLM [Кондратьев и др., 2024]. Последняя модель была модифицирована блоком для учета типов почв на водосборе и особенностей внесения удобрений от сельскохозяйственной деятельности. Показано, что изменения сельскохозяйственной нагрузки за счет внедрения НДТ мало скажутся на экологическом состоянии Онежского озера, но будут полезны для сохранения состояния качества вод малых рек на водосборе. Даны прогностические оценки возможного изменения поступления азота и фосфора в озеро к середине XXI века в результате изменения стока с водосбора при условии реализации двух RCP-сценариев: RCP 2.6 и RCP 8.5. Реализация сценария антропогенного воздействия на окружающую среду (RCP 2.6) на всех объектах может привести к повсеместному снижению биогенной нагрузки на озеро, а при реализации экологически неблагоприятного сценария (RCP 8.5) можно ожидать увеличения водного стока и соответствующего увеличения выноса фосфора на 2,3–16,6 % и азота на 14,0–22,5 %. Расчеты показали, что при возможном увеличении на 30 % темпов роста продукции форели к 2050 г. по сравнению с 2021 г. может также примерно на 30 % увеличиться биогенная нагрузка на озеро.

С помощью 3D-модели SPLEM<sup>1</sup> А. В. Исаевым [Isaev et al., 2022] показаны возможные последствия изменения экосистем озера до 2050 г. [Филатов и др., 2025] по данным анализа изменчивости биогенных веществ (фосфора и азота), первичной продукции фитопланктона, как наиболее значимых показателей, характеризующих степень эвтрофирования водоема. Получены количественные оценки ассимиляционного потенциала (АП), которые для Онежского озера в целом составили примерно 780 т Р/год и 15 000 т N/год, при этом пелагиаль озера должна сохранять свой олиготрофный статус, что позволяет принять эти величины в качестве оценок по сбросу фосфора и азота в озеро. С использованием модели SPLEM была оценена интегральная нагрузка по биогенным веществам как на все озеро, так и для отдельных его

районов и рассчитаны значения годовой первичной продукции (г С/м<sup>2</sup>/год) для основных лимнических районов Онежского озера. При реализации принятого сценария изменений климата RCP 8.5 средняя многолетняя температура поверхности воды в вегетационный период может увеличиться с 9,8 °С (в 1991–2020 гг.) до 12,2 °С (2021–2050 гг.). При биогенной нагрузке, близкой к АП (поступление фосфора 801 т/год, азота – 11 861 т/год), и при линейном росте производства форели с 2020 до 2050 г. в Петрозаводской и Кондопожской губах будет наблюдаться основной рост первичной продукции фитопланктона, которая может составить 56,7 и 44,5 г С/м<sup>2</sup>/год соответственно, что больше современного на 15–20 %. Такие высокие показатели ПП являются опасными не только в губах и заливах озера, но и для центральной его части из-за интенсивного перемешивания, циркуляции вод озера, что в конечном итоге может повлиять на изменение трофического статуса озера и его эвтрофирование.

## Результаты и выводы

Представлены результаты оценки состояния и прогнозирования изменений водосбора и экосистемы Онежского озера, трофического статуса, которые необходимы для оценки природного капитала и экосистемных услуг системы «озеро – водосбор». Предложены базовые показатели для оценки состояния и прогнозирования динамики системы. Контроль процесса эвтрофирования озера предполагает следующие основные этапы: 1) определение качества воды по предложенным химическим и биологическим показателям (табл.); 2) сравнение текущих величин биологических показателей с биологическими критериями трофического состояния экосистемы; 3) определение ассимиляционного потенциала водной экосистемы; 4) оценку состояния экосистемы озера по результатам применения комплекса моделей; 5) рекомендации по снижению антропогенной фосфорной нагрузки на водоем для лиц, принимающих решения.

С учетом известных недостатков отчетности 2-ТП (водхоз) следует рекомендовать предприятиям водосбора Онежского озера разработать и реализовать программы повышения экологической эффективности для предоставления информации о реальных сбросах биогенных элементов, взвешенных веществ, биологически и химически окисляемых веществ в Онежское озеро.

Важный аспект выполненной работы заключается в системном подходе для реализации

<sup>1</sup> SPLEM – Saint-Petersburg Limnological Model of Ecosystem – трехмерная модель экосистемы озера, разработанная в Санкт-Петербурге.

интегрированного мониторинга с применением данных мониторинга, дистанционных наблюдений, созданных баз данных и баз знаний, комплекса математических моделей для экосистемы не только Онежского озера, но и водосборной территории.

Предлагается общая схема реализации интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор» (рис. 4).



Рис. 4. Общая схема реализации интегрированного мониторинга системы «Онежское озеро – водосбор» [по: Меншуткин и др., 2014 с изменениями]

Fig. 4. General implementation scheme for integrated monitoring the Lake Onego – catchment system [after Menshutkin et al., 2014 with changes]

Необходимо дальнейшее совершенствование созданной системы интегрированного мониторинга Онежского озера и водосбора с использованием адаптивного подхода. На основе предложенных разработок требуется выполнить оценку экосистемных услуг, природного капитала Онежского озера и водосбора.

## Литература

- Абакумов В. А., Сушеня Л. М. Гидробиологический мониторинг пресных вод и пути его совершенствования // Экологические модификации и критерии экологического нормирования: Труды междунар. симпоз. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 41–51.
- Астраханцев Г. П., Меншуткин В. В., Минина Т. Р. Использование моделей экосистем больших озер для получения оценок их ассимиляционного потенциала // Управление большими системами. Вып. 55. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 17–34.

Ашихмина Т. Я. Биоиндикация и биотестирование: методы познания экологического состояния окружающей среды. Киров: ВятГУ, 2005. Вып. 4. Ч. 3. 51 с.

Баклагин В. Н. Формирование структуры единой базы данных гидробиологических и гидрохимических измерений Онежского озера // Физическое и математическое моделирование процессов в гео-средах: Мат-лы 9-й Междунар. конф.-школы молодых ученых. М., 2023. С. 38–41.

Болотова Н. Л., Мухин И. А., Лопичева О. Г. Подходы к оценке экосистемных услуг Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 173–187. doi: 10.17076/lim1632

Бобылев С. Н., Барабошкина А. В., Курдин А. А., Яковлева Е. Ю., Бубнов А. С. Национальные цели развития России и ключевые индикаторы устойчивости // Вестник Московского университета. Сер. 6. Экономика. 2025. Т. 60(1). С. 40–59. doi: 10.55959/MSU0130-0105-6-60-1-3

Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.

Вильянен М., Ниинийоа Р., Драбкова В. Г. и др. Разработка и реализация интегрированной программы природоохранного мониторинга Ладожского озера: охрана и устойчивое использование водных ресурсов / Проект Tacis DIMPLA. Йоэнсуу, 1999. 24 с.

Винберг Г. Г. Эвтрофирование и охрана вод // Гидробиологический журнал. 1974. Т. 10, № 2. С. 129–135.

Волков С. Н., Рублевская О. Н., Тихонова И. О., Гусева Т. В., Иикканен М. Опыт развития объектов водоотведения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»: этапы перехода к наилучшим доступным технологиям // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 6. С. 104–120. doi: 10.35567/1999-4508-2020-6-6

Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Современная биогенная нагрузка на Онежское озеро от крупнейших его притоков // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 53–62. doi: 10.17076/lim1925

Гусев А. А. Ассимиляционный потенциал окружающей среды в системе прав собственности на природные ресурсы // Экономика и математические методы. 1997. Т. 33, № 3. С. 5–15.

Данилов-Данильян В. И. Структура стоимости и структура экономики в век глобализации // Век глобализации. 2015. № 1. С. 3–20.

Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 251 с.

Дмитриев В. В., Огурцов А. Н., Васильев В. Ю. Интегральная оценка экологического состояния водных объектов, трофности и качества воды, экологической напряженности рек, озер и морских акваторий. СПб.: Арт-Экспресс, 2010. С. 143–153.

Дружинин П. В. Развитие экономики регионов Северо-Западного федерального округа в условиях миграции в Санкт-Петербургскую агломерацию // Балтийский регион. 2023. Т. 15, № 3. С. 100–116. doi: 10.5922/2079-8555-2023-3-6

Жулидов А. В., Хоружая Т. А. Рекомендации. Методы токсикологической оценки загрязнения экосистем. М., 1994. 124 с.

Интегрированное управление водными ресурсами: математические модели и информационные технологии. Препринт / Под ред. Л. А. Руховца. СПб.: СПб ЭМИ РАН, 2007. 65 с.

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

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т., Георгиев А. П., Исакова К. В., Толстяков А. В., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла а, продукция фитопланктона. Свидетельство о госрегистрации базы данных RU 2023621189. Правообладатель: КарНЦ РАН. Номер заявки: 2023620710. Дата регистрации: 20.03.2023. Дата публикации: 12.04.2023.

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

Кондратьев С. А., Брюханов А. Ю., Шмакова М. В., Расулова А. М., Галахина Н. Е., Зобков М. Б., Васильев Э. В., Обломкова Н. С. Оценка возможных изменений биогенной нагрузки на Онежское озеро под воздействием антропогенных и климатических факторов // Водные ресурсы. 2024. Т. 51, № 3. С. 285–296. doi: 10.31857/S0321059624030056

Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменение экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Литвинова И. А., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Макарова Е. М., Ефимова А. Н. Антропогенная нагрузка и биоиндикация состояния Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Свидетельство о госрегистрации базы данных RU 2021620975. Правообладатель: КарНЦ РАН. Номер заявки: 2021620861. Дата регистрации: 28.04.2021. Дата публикации: 17.05.2021.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научно-го центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Лозовик П. А. Оценка ассимиляционной способности к фосфорной и органической нагрузкам и нормирование допустимого антропогенного воздействия на водные объекты по кинетической и гидрогеохимической моделям // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 88–95.

Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Математические модели водных экосистем в задачах управления ресурсами озер // Водное хозяйство России. 2014. № 3. С. 100–108.

Моисеенко Т. И. Оценка качества вод и «здоровья» экосистем с позиций экологической парадигмы // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 104–124. doi: 10.35567/1999-4508-2017-3-7

Неверова-Дзиопак Е. В., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.

Никаноров А. М., Емельянова В. П. Комплексная оценка качества поверхностных вод суши // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 1. С. 61–69.

Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.

Онежское озеро. Атлас / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Озера и климат: модели и методы // Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы / Под ред. В. П. Дымникова, В. Н. Лыкова, Е. П. Гордова. Томск: Изд. дом ТГУ, 2014. С. 256–326.

Руховец Л. А., Гусева В. Н., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полосков В. Н. Использование рыночных механизмов сохранения водных ресурсов великих озер Европы // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. VI. СПб.: Нестор-История, 2007. С. 294–309.

Ситкина К. С. Эколого-экономическая оценка природных территорий // Экономика природопользования. 2010. № 1. С. 8–54.

Скобелев Д. О., Бобылев С. Н., Белозеров Г. А., Кузьмина Е. В. Экологическое благополучие и капитализация природных ресурсов // Естественно-гуманитарные исследования. 2025. № 1. С. 354–361.

Скобелев Д. О. Очередной этап развития системы эколого-технологического регулирования промышленности в России // Экономика устойчивого развития. 2022. № 1(49). С. 83–89. doi: 10.52531/1682-1696-2022-22-4-49-59

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев и др. М.: РАН, 2021. 637 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3

Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Макарова Е. М., Смирнова В. С. Современное трофическое состояние и качество воды Онежского озера // Биология внутренних вод. 2023. № 6. С. 740–746. doi: 10.31857/S0320965223060335

Филатов Н. Н., Дружинин П. В., Исаев А. В. и др. Обоснование возможной биогенной нагрузки на Онежское озеро и прогностические оценки изменения его экосистемы при разных климатических и социально-экономических сценариях // Водные ресурсы. 2025. Т. 52, № 4. С. 724–737.

Филатов Н. Н., Савчук О. П., Баклагин В. Н., Галахина Н. Е., Зобков М. Б., Исаев А. В., Кондра-  
тьев С. А., Калинин Н. М., Новикова Ю. С., Расу-  
лова А. М., Шмакова М. В. Диагноз состояния и  
изменений экосистемы Онежского озера и во-  
досбора на основе информационно-аналитиче-  
ской системы // *Фундаментальная и приклад-  
ная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 2. С. 10–24. doi:  
10.59887/2073-6673.2024.17(2)-2

Экосистемные услуги России: Прототип нацио-  
нального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем  
/ Ред.-сост.: Е. Н. Букварева, Д. Г. Замолотчиков. М.:  
Изд-во ЦОДП, 2016. 148 с.

Arhonditsis G. B., Neumann A., Shimoda Y.,  
Kim D.-K., Dong F., Onandia G., Yang C., Javed A.,  
Brady M., Visha A., Ni F., Cheng V. Castles built on sand  
or predictive limnology in action? Part A: Evaluation of an  
integrated modelling framework to guide adaptive mana-  
gement implementation in Lake Erie. *Ecol. Inform.* 2019.  
Vol. 53. Art. 100968. doi: 10.1016/j.ecoinf.2019.05.014

Arrow K., Bolin B., Costanza R., Dasgupta P.,  
Folke C., Holling C. S., Jansson B.-O., Levin S.,  
Mäler K.-G., Perrings Ch., Pimentel D. Economic growth,  
carrying capacity, and the environment // *Science*.  
1995. Vol. 268, iss. 5210. P. 520–521. doi: 10.1126/  
science.268.5210.52

Canadian water quality guidelines for the protection  
of aquatic life / Canadian Council of Ministers of the En-  
vironment. Ottawa, 2004. 76 p.

Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnol.*  
*Oceanogr.* 1977. Vol. 22(2). P. 361–369. doi: 10.4319/  
lo.1977.22.2.0361

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S.,  
Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S.,  
O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P.,  
van den Belt M. The value of the world's ecosystem  
services and natural capital // *Nature*. 1997. Vol. 387.  
P. 253–260.

Costanza R., Daly H. E. Toward an ecological eco-  
nomics // *Ecological Modelling*. 1987. Vol. 38. P. 1–7.  
doi: 10.1016/0304-3800(87)90041-X

Costanza R., de Groot R., Sutton P. Changes in  
the global value of ecosystem services // *Glob. Envi-  
ron. Change*. 2014. Vol. 26. P. 152–158. doi: 10.1016/  
j.gloenvcha.2014.04.002

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and  
of the Council of 23 October 2000 establishing a frame-  
work for Community action in the field of water policy  
// Official J. Europ. Communities. 2000. L. 327/1. 118 p.

Faber S., Costanza R., Childers D. L., Erickson J.,  
Gross K., Grove M., Hopkinson C. S., Kahn J., Pin-  
cetl S., Troy A., Warren P., Wilson M. Linking ecology and  
economics for ecosystem management // *Biosci.* 2006.  
Vol. 56, no. 2. P. 121–133. doi: 10.1641/0006-3568(2006)  
056[0121:LEAEFE]2.0.CO;2

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current  
chemistry of Lake Onego and its spatial and tempo-  
ral changes for the last three decades with special  
reference to nutrient concentrations // *Environ. Nano-  
technol. Monit. Manag.* 2022. Vol. 17. Art. 100619. doi:  
10.1016/j.enmm.2021.100619

Hellweger F. L., Martin R. M., Eigemann F. Models  
predict planned phosphorus load reduction will make

Lake Erie more toxic // *Science*. 2022. Vol. 376,  
no. 6596. P. 1001–1005. doi: 10.1126/science.abm6791

Isaev A. V., Savchuk O. P., Filatov N. N. Three-  
dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus bio-  
geochemical dynamics in Lake Onego ecosystem,  
1985–2015. Part I: Long-Term Dynamics and Spatial  
Distribution // *Fundamental and Applied Hydrophys-  
ics*. 2022. Vol. 15(2). P. 76–97. doi: 10.48612/fpg/e1m2-  
63b5-rhvg

Jenny J. P., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists'  
warning to humanity: rapid degradation of large lakes  
// *J. Great Lakes Res.* 2020. Vol. 46. P. 686–702. doi:  
10.1016/j.jglr.2020.05.006

Livingstone D. R. Oxidative stress in aquatic orga-  
nisms in relation to pollution and aquaculture // *Rev*  
*Me'd Ve't*. 2003. Vol. 154. P. 427–430.

Newman M. C., Jagoe Ch. H. (eds.). *Ecotoxicology:  
a hierarchical treatment*. New-York: Levis Publ. Ltd., 1996.  
411 p.

Rodhe W. Crystallization of eutrophication concepts  
in Northern Europe // *Scr. Limnol. Upsal. Coll.* 3A. 1967.  
No. 144. P. 1–37.

Stow C. A., Stumpf R. P., Rowe M. D., Johnson L. T.,  
Carrick H. J., Yerubandi R. Model assumptions limit im-  
plications for nitrogen and phosphorus management  
// *J. Great Lakes Res.* 2022. Vol. 48, Iss. 6. P. 1735–  
1737. doi: 10.1016/j.jglr.2022.09.003

Vollenweider R. A., Kerekes J. J. (eds.). *Eutrophica-  
tion of waters: monitoring, assessment and control*.  
Paris: OECD, 1982. 154 p.

Wulff F., Sokolov A., Savchuk O. P. Nest – a decision  
support system for management of the Baltic Sea. A user  
manual. Technical Report No. 10 / Baltic Nest Institute,  
Stockholm University Baltic Sea Centre. 2013. 69 p.

## References

Abakumov V. A., Sushchenya L. M. Hydrobiologi-  
cal monitoring of freshwater and ways to improve it.  
*Ekologicheskie modifikatsii i kriterii ekologicheskogo  
normirovaniya: Trudy mezhdunar. simpoz. = Ecological  
modifications and criteria for environmental standar-  
dization: Proceedings of the int. symposium*. Leningrad:  
Gidrometeoizdat; 1991. P. 41–51. (In Russ.)

Arhonditsis G. B., Neumann A., Shimoda Y.,  
Kim D.-K., Dong F., Onandia G., Yang C., Javed A.,  
Brady M., Visha A., Ni F., Cheng V. Castles built on sand  
or predictive limnology in action? Part A: Evaluation of  
an integrated modelling framework to guide adaptive  
management implementation in Lake Erie. *Ecol. Inform.*  
2019;53:100968. doi: 10.1016/j.ecoinf.2019.05.014

Arrow K., Bolin B., Costanza R., Dasgupta P., Folke C.,  
Holling C. S., Jansson B.-O., Levin S., Mäler K.-G.,  
Perrings Ch., Pimentel D. Economic growth, carrying ca-  
pacity, and the environment. *Science*. 1995;268(5210):  
520–521. doi: 10.1126/science.268.5210.52

Astrakhantsev G. P., Menshutkin V. V., Minina T. R.  
Using large lake ecosystem models to estimate their  
assimilation potential. *Upravlenie bol'shimi sistemami  
= Large Systems Management*. Iss. 55. Moscow: IPU  
RAN; 2015. P. 17–34. (In Russ.)

Ashikhmina T. Ya. Bioindication and biotesting:  
methods for understanding the ecological state of the

environment. Iss. 4. Part. 3. Kirov: VyatGU; 2005. 51 p. (In Russ.)

Baklagin V. N. Formation of the structure of a unified database of hydrobiological and hydrochemical measurements of Lake Onego. *Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie protsessov v geosredakh: Mat-ly 9-i Mezhdunar. konf.-shkoly molodykh uchenykh = Physical and mathematical modeling of processes in geoenvironments: Proceedings of the 9<sup>th</sup> int. conference-school of young scientists*. Moscow; 2023. P. 38–41. (In Russ.)

Bobylev S. N., Baraboshkina A. V., Kurdin A. A., Yakovleva E. Yu., Bubnov A. S. National development goals of Russia and key sustainability indicators. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika = Bulletin of Moscow University. Series 6. Economics*. 2025;60(1):40–59. (In Russ.). doi: 10.55959/MSU0130-0105-6-60-1-3

Bolotova N. L., Mukhin I. A., Lopicheva O. G. Approaches to assessing ecosystem services of Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;6:173–187. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1632

Boulion V. V. Primary production of plankton in inland waters. Leningrad: Nauka; 1983. 150 p. (In Russ.)

Bukhareva E. N., Zamolodchikov D. G. (ed.-comp.). Ecosystem services of Russia: prototypical national report. Vol. 1. Terrestrial ecosystem services. Moscow: TsODP; 2016. 148 p. (In Russ.)

Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life. Canadian Council of Ministers of the Environment. Ottawa; 2004. 76 p.

Carlson R. E. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 1977;22(2):361–369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farberk S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 1997;387:253–260.

Costanza R., Daly H. E. Toward an ecological economics. *Ecological Modelling*. 1987;38:1–7. doi: 10.1016/0304-3800(87)90041-X

Costanza R., de Groot R., Sutton P. Changes in the global value of ecosystem services. *Glob. Environ. Change*. 2014;26:152–158. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

Danilov-Danil'yan V. I. Value structure and economic structure in the age of globalization. *Vek globalizatsii = Age of Globalization*. 2015;1:3–20. (In Russ.)

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official J. Europ. Communities*. 2000. L. 327/1. 118 p.

Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N., Vasil'ev V. Yu. Integral assessment of the ecological state of water bodies, trophic status and water quality, and ecological stress in rivers, lakes, and marine areas. St. Petersburg: Art-Ekspress; 2010. P. 143–153. (In Russ.)

Druzhinin P. V. Economic development of Russia's north-western regions and migration to the St. Petersburg agglomeration. *Baltiiskii region = Baltic Re-*

*gion*. 2023;15(3):100–116. (In Russ.). doi: 10.5922/2079-8555-2023-3-6

Galakhina N. E., Zobkov M. B. Current nutrient load on Lake Onego from its largest tributaries. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024;5:53–62. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1925

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2022;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Gusev A. A. Assimilation potential of the environment in the system of property rights to natural resources. *Ekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods*. 1997;33(3):5–15. (In Russ.)

Faber S., Costanza R., Childers D. L., Erickson J., Gross K., Grove M., Hopkinson C. S., Kahn J., Pincetl S., Troy A., Warren P., Wilson M. Linking ecology and economics for ecosystem management. *Biosci.* 2006;56(2):121–133. doi: 10.1641/0006-3568(2006)056[0121:LEAEFE]2.0.CO;2

Filatov N. N. (ed.). Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 251 p. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Druzhinin P. V., Isaev A. V. et al. Justification of the possible biogenic load on Lake Onega and prognostic assessments of changes in its ecosystem under different climatic and socioeconomic scenarios. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2025;52(4):724–737. (In Russ.)

Filatov N. N., Savchuk O. P., Baklagin V. N., Galakhina N. E., Zobkov M. B., Isaev A. V., Kondrat'ev S. A., Kalinkina N. M., Novikova Yu. S., Rasulova A. M., Shmakova M. V. Diagnosis of the state and changes in the ecosystem of Lake Onego and its catchment based on the information-analytical system. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(2):10–24. (In Russ.). doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-2

Hellweger F. L., Martin R. M., Eigemann F. Models predict planned phosphorus load reduction will make Lake Erie more toxic. *Science*. 2022;376(6596):1001–1005. doi: 10.1126/science.abm6791

Isaev A. V., Savchuk O. P., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part I: Long-Term Dynamics and Spatial Distribution. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2):76–97. doi: 10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg

Jenny J. P., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists' warning to humanity: rapid degradation of large lakes. *J. Great Lakes Res.* 2020;46:686–702. doi: 10.1016/j.jglr.2020.05.006

- Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. Response of Lake Onego ecosystem in the spring–summer period to anomaly high air temperature in winter 2019/2020. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = Izvestiya RAS. Geographical Series*. 2021;85(6):888–899. (In Russ.). doi: 10.31857/S2587556621060078
- Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Syarki M. T., Georgiev A. P., Isakova K. V., Tolstyakov A. V., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. Limnological indicators of Lake Onega and the Vygozerskoye Reservoir: water temperature, chlorophyll *a* concentration, and phytoplankton production. State registration certificate RU 2023621189. Copyright holder: KarRC RAS. Application number: 2023620710. Registration date: March 20, 2023. Publication date: April 12, 2023. (In Russ.)
- Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 395 p. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Bryukhanov A. Yu., Shmakova M. V., Rasulova A. M., Galakhina N. E., Zobkov M. B., Vasil'ev E. V., Oblomkova N. S. Assessment of possible changes in the biogenic load on Lake Onega under the influence of anthropogenic and climatic factors. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2024;51(3):285–296. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059624030056
- Kondrat'ev S. A. et al. (eds). Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate. Moscow: RAN; 2021. 637 p. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- List of fishery standards for maximum permissible concentrations (MPC) and approximate safe impact levels (OSIL) of harmful substances for the water of water bodies of fishery importance. Moscow: VNIRO; 1999. 304 p. (In Russ.)
- Litvinova I. A., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Makarova E. M., Efimova A. N. Anthropogenic load and bioindication of the state of Lake Onega (Upper Svir Reservoir). State registration certificate RU 2021620975. Copyright holder: KarRC RAS. Application number: 2021620861. Registration date: April 28, 2021. Publication date: May 17, 2021. (In Russ.)
- Livingstone D. R. Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquaculture. *Rev Me'd Ve't*. 2003;154:427–430.
- Lozovik P. A. Assessment of assimilation capacity for phosphorus and organic loads and standardization of permissible anthropogenic impact on water bodies using kinetic and hydrogeochemical models. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii = The largest lake-reservoirs of the Northwest of European Russia*. Petrozavodsk; 2015. P. 88–95. (In Russ.)
- Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondratyev S., Litvinenko A., Litvinova I. Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;5:35–52. (In Russ.). doi: 10.17076/lim303
- Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Mathematical models of aquatic ecosystems in lake resource management problems. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Management of Russia*. 2014;3:100–108. (In Russ.)
- Moiseenko T. I. Assessment of water quality and ecosystem 'health' from the standpoint of the ecological paradigm. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Management of Russia*. 2017;3:104–124. (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2017-3-7
- Neverova-Dziopak E. V., Tsvetkova L. I. Assessment of the trophic state of surface waters. St. Petersburg: SPbGASU; 2020. 176 p. (In Russ.)
- Newman M. C., Jagoe Ch. H. (eds.). Ecotoxicology: a hierarchical treatment. New-York: Levis Publ. Ltd.; 1996. 411 p.
- Nikanorov A. M., Emel'yanova V. P. Comprehensive assessment of the quality of surface waters on land. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2005;32(1):61–69. (In Russ.)
- Odum Yu. Fundamentals of ecology. Moscow: Mir; 1975. 740 p. (In Russ.)
- Rodhe W. Crystallization of eutrophication concepts in Northern Europe. *Scr. Limnol. Upsal. Coll.* 3A. 1967;144:1–37.
- Rukhovets L. A., Filatov N. N. Lakes and climate: models and methods. *Modeli i metody v probleme vzaimodeistviya atmosfery i gidrosfery = Models and methods in the problem of atmosphere-hydrosphere interaction*. Tomsk: TGU; 2014. P. 256–326. (In Russ.)
- Rukhovets L. A., Guseva V. N., Astrakhan-tsev G. P., Minina T. R., Poloskov V. N. Using market mechanisms to conserve water resources in European Great Lakes. *Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii = Economic and mathematical studies: Math: models and information technologies*. VI. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2007. P. 294–309. (In Russ.)
- Rukhovets L. A. (ed.). Integrated water resources management: mathematical models and information technologies. Preprint. St. Petersburg: SPb EMI RAN; 2007. 65 p. (In Russ.)
- Sitkina K. S. Ecological-economic assessment of natural areas. *Ekonomika prirodopol'zovaniya = Economics of natural resources*. 2010;1:8–54.
- Skobelev D. O., Bobylev S. N., Belozarov G. A., Kuz'mina E. V. Environmental well-being and capitalization of natural resources. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya = Natural Sciences and Humanities*. 2025;1:354–361. (In Russ.)
- Skobelev D. O. The next stage in the development of the system of environmental and technological regulation of industry in Russia. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya = Economics of Sustainable Development*. 2022;1(49):83–89. (In Russ.). doi: 10.52531/1682-1696-2022-22-4-49-59
- Stow C. A., Stumpf R. P., Rowe M. D., Johnson L. T., Carrick H. J., Yerubandi R. Model assumptions limit implications for nitrogen and phosphorus management. *J. Great Lakes Res.* 2022;48(6):1735–1737. doi: 10.1016/j.jglr.2022.09.003
- Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Makarova E. M., Smirnova V. S. Current trophic state and water quality of Lake Onega. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2023;6:740–746. (In Russ.). doi: 10.31857/S0320965223060335

Vil'yanen M., Niinioja R., Drabkova V. G. et al. Development and implementation of an integrated environmental monitoring program for Lake Ladoga: protection and sustainable use of water resources. Project. Taxis DIMPLA. Joensuu; 1999. 24 p. (In Russ.)

Vinberg G. G. Eutrophication and water protection. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Hydrobiological Journal*. 1974;10(2):129–135. (In Russ.)

Volkov S. N., Rublevskaya O. N., Tikhonova I. O., Guseva T. V., Iikkanen M. Experience of the SUE 'Vodokanal of St. Petersburg' in developing water disposal facilities as the steps towards transition to the best available techniques. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy,*

*tekhnologii, upravlenie = Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020;6:104–120. (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2020-6-6

Vollenweider R. A., Kerekes J. J. (eds.). Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control. Paris: OECD; 1982. 154 p.

Wulff F., Sokolov A. Savchuk O. P. Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea. A user manual. Technical Report No. 10. Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre; 2013. 69 p.

Zhulidov A. V., Khoruzhaya T. A. Recommendations. Methods of toxicological assessment of ecosystem pollution. Moscow; 1994. 124 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 07.10.2025; принята к публикации / accepted: 13.10.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Филатов Николай Николаевич

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, профессор,  
главный научный сотрудник

e-mail: nfilatov@rambler.ru

### Лукина Юлия Николаевна

д-р биол. наук, и. о. директора

e-mail: jlukina@list.ru

### Галахина Наталия Евгеньевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник,  
руководитель лаборатории гидрохимии  
и гидрогеологии

e-mail: kulakovanata@mail.ru

### Калинкина Наталия Михайловна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: cerioda@mail.ru

### Теканова Елена Валентиновна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: etekanova@mail.ru

### Молчанова Яна Павловна

канд. техн. наук, доцент кафедры ЮНЕСКО  
«Зеленая химия для устойчивого развития»

e-mail: molchanova.i.p@muctr.ru

## CONTRIBUTORS:

### Filatov, Nikolai

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,  
Chief Researcher

### Lukina, Yulia

Dr. Sci. (Biol.), Acting Director

### Galakhina, Natalia

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher,  
Head of Laboratory

### Kalinkina, Natalia

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

### Tekanova, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

### Molchanova, Yana

Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

УДК 639(556.55)

## ЛИМИТИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР СРЕДНЕТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ АКВАКУЛЬТУРЫ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ЛЕСНОГО ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ)

Н. Л. Болотова<sup>1\*</sup>, И. А. Мухин<sup>2</sup>, О. Г. Лопичева<sup>1</sup>, С. Ю. Арашин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Вологодский государственный университет (ул. Ленина, 15, Вологда, Россия, 160000),  
\*bolotova.vologda@mail.ru

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет (ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007)

<sup>3</sup> Институт биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина РАН (109, Борок, Ярославская область, Россия, 152742)

Статья посвящена актуальной проблеме развития аквакультуры и оценке перспективности использования малых озер, учитывая их многочисленность и разнообразие, наряду с наличием экологических рисков. Анализируется ландшафтная обусловленность лимногенеза и лимитирующие факторы рыборазведения на примере малого озера Лесного (Вологодская область) как модельного водоема, типичного для широко распространенных среднетаежных ландшафтов. Учитывается, что генезис территории в краевых зонах покровного оледенения Северо-Запада определяет происхождение, особенности морфологии, развитие и современное состояние озер как структурных элементов ландшафта. Комплексное исследование модельного водоема позволило выделить ключевые показатели, отражающие нежелательные процессы для выращивания рыб, учитывая влияние природных и антропогенных факторов. Показано, что мелководность озер, расположенных в низменной заболоченной местности, стимулирует их сукцессию в сторону гумификации, дистрофикации, закисления грунтов, цветения, ухудшения газового режима, низкого уровня развития кормовой базы и формирования окунево-плотвичных ихтиоценозов. Результаты исследования модельного водоема возможно аппроксимировать на другие водоемы ландшафта в рамках адекватного выбора и планирования использования водного фонда в целях аквакультуры. Целью работы было выявить лимитирующие факторы использования для аквакультуры малых водоемов на примере модельного озера Лесного как типичного для широко распространенных среднетаежных ландшафтов и обосновать методологический алгоритм исследований в рамках ландшафтно-экосистемного подхода.

Ключевые слова: аквакультура; малые озера; среднетаежные ландшафты; ландшафтная обусловленность; лимитирующие факторы рыборазведения

Для цитирования: Болотова Н. Л., Мухин И. А., Лопичева О. Г., Арашин С. Ю. Лимитирующие факторы использования малых озер среднетаежных ландшафтов для развития аквакультуры (на примере озера Лесного Вологодской области) // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 151–165. doi: 10.17076/lim2226

**N. L. Bolotova<sup>1\*</sup>, I. A. Mukhin<sup>2</sup>, O. G. Lopicheva<sup>1</sup>, S. Yu. Arashin<sup>1,3</sup>. FACTORS LIMITING THE AQUACULTURAL USE OF SMALL LAKES IN MID-BOREAL LANDSCAPES (CASE STUDY OF LAKE LESNOYE, VOLOGDA REGION)**

<sup>1</sup>Vologda State University (15 Lenina St., 160000 Vologda, Russia),  
\*bolotova.vologda@mail.ru

<sup>2</sup>Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia)

<sup>3</sup>Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences (109, 152742 Borok, Yaroslavl Region, Russia)

This article examines the development of aquaculture in small lakes. The landscape-dependent limnogenesis and limiting factors for fish farming are analyzed through the case of the small Lake Lesnoye (Vologda Region) as a model reservoir typical of widespread mid-boreal landscapes. The lake's genesis, morphology, evolution, and current state have been determined by the region's location in the north-western ice sheet margin. Having comprehensively studied this model reservoir, we identified key indicators of processes of both natural and anthropogenic nature unfavorable for fish farming. It is shown that the shallowness of lakes located in low-lying wet areas stimulates their succession towards humification, dystrophication, soil acidification, algal blooms, deterioration of the gas regime, low feeding capacity and formation of perch and roach dominated communities. The results of the model lake study can be approximated for other water bodies in this type of landscape, allowing for appropriate selection and planning of water resources to be used in aquaculture. The aim was to identify the limitations for aquacultural use of small water bodies through the case study of Lake Lesnoye as a model typical of widespread mid-boreal landscapes, and to substantiate a methodological research algorithm within the landscape-ecosystem approach.

**Keywords:** aquaculture; small lakes; mid-boreal landscapes; landscape determinacy; limiting factors for fish farming

For citation: Bolotova N. L., Mukhin I. A., Lopicheva O. G., Arashin S. Yu. Factors limiting the aquacultural use of small lakes in mid-boreal landscapes (case study of Lake Lesnoye, Vologda Region). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 151–165. doi: 10.17076/lim2226

## **Введение**

Снижение рыбных ресурсов в пресноводных водоемах и обширная мировая практика аквакультуры стимулирует интерес к ее развитию в России как к компенсационному пути обеспечения населения доступной рыбопродукцией [Козлов, 2005; Багров, Мамонтов, 2008; Павленко и др., 2017 и др.]. Технологии аквакультуры дают возможность поддержания численности редких и ценных популяций. Привлекает и социальная значимость отрасли, которая может создавать не только качественные продукты питания, но и рабочие места, способствуя занятости населения. Поэтому стратегия рыбоводства, направленная на развитие аквакультуры, поддерживается государственной политикой и реализуется в рамках федеральных и региональных программ, включая и Вологодскую область. Тем более что географическое расположение области обеспечивает климатически благоприятные условия для рыбоводства, а разнообразие водных объектов позволяет

развивать разные направления аквакультуры: садковой, рекреационной, пастбищной и индустриальной [Озерные..., 1981; Природа..., 2007; Степанов, Болотова, 2021].

Популяризация среди предпринимателей идеи развития аквакультуры на малых озерах усилила востребованность разработки рыбоводно-биологических обоснований (РБО), что, соответственно, требует научного обеспечения. При любом дополнительном воздействии, включая рыбоводную деятельность, необходима оценка текущего состояния озер. Следует отметить, что результаты исследований при выявлении бесперспективности использования малых озер под аквакультуру не только с позиций рентабельности, но и с учетом экологических рисков не устраивают заказчиков проектов.

Кроме того, в рамках государственной политики, направленной на развитие аквакультуры, создание РБО имеет бюджетное финансирование. Это требует обоснованности выбора малых озер для исследований, учитывая их

разнотипность и расположение в разных ландшафтах. Поэтому важным моментом является знание ландшафтной обусловленности лимногенеза, что позволяет прогнозировать лимитирующие факторы, создающие экологические риски рыбозабоев. Тем более что с ландшафтами связано формирование водосборов, а их особенности влияют на возможности развития инфраструктуры, демографическую обстановку, что является также экономической составляющей рентабельности использования малых озер для развития аквакультуры.

Актуальность ландшафтно-экосистемного подхода очевидна для Вологодской области, территория которой располагается в подзонах средней и южной тайги в ландшафтах с выраженным заболачиванием. Это в условиях малых мелководных озер стимулирует их гумификацию и дистрофикацию, создавая неблагоприятные условия для рыбозабоев [Озерные..., 1981; Болотова и др., 2025]. Целью работы было выявить лимитирующие факторы использования для аквакультуры малых озер на примере модельного озера Лесного как типичного для широко распространенных среднетаежных ландшафтов и обосновать методологический алгоритм исследований в рамках ландшафтно-экосистемного подхода.

## Материалы и методы

Теоретической основой методологического алгоритма проведенных исследований, связанных с реализацией развития аквакультуры на малых озерах Вологодской области, явилось положение о ландшафтной обусловленности лимногенеза [Воробьев, 1991].

Сложный генезис территории Северо-Запада, подвергшейся неоднократному оледенению, привел к формированию 33 ландшафтов в пределах Вологодской области, более половины которых относятся к среднетаежной провинции [Природа..., 2007]. Последнее определило приуроченность района исследований к среднетаежным ландшафтам. Их значимость определяется масштабной протяженностью в рассматриваемом регионе как части среднетаежной зоны, занимающей более трети территории холодного пояса России.

Модельным объектом, анализируемым в статье, послужило типичное малое лесное озеро, что отразилось и в его названии – Лесное, расположенное в Прикубенском моренном равнинном средневысотном среднетаежном ландшафте [Природа..., 2007]. Это один из восьми равнинных ландшафтов среднетаежной подпровинции Северо-Двинской области,

охватывающий крупные бассейны рек Северо-Запада на Восточно-Европейской равнине (рис. 1, А).

Многочисленность малых озер определяет необходимость подхода к их типизации на ландшафтном уровне, иерархически более высоком, чем экосистемный, с учетом их происхождения как приоритетного фактора лимногенеза, через который преломляется и антропогенное воздействие. Комплексные исследования оз. Лесного как модельного и типичного водоема для среднетаежных ландшафтов позволили конкретизировать методологический алгоритм изучения малых озерных экосистем. Это дает возможность обосновать критерии их выбора в целях рыбозабоев на основе выявления лимитирующих факторов, отражающих ландшафтную обусловленность лимногенеза. Возможность аппроксимации результатов изучения модельного водоема для оценки состояния других озер ландшафта определяется следующими позициями.

При исследовании Вологодской области в основу ландшафтной классификации малых озер были положены тип морфологической структуры и геохимические особенности ландшафта [Воробьев, 1991]. Данный подход лежит в основе выделения показателей, характерных для озерных систем Северо-Запада, располагающихся в ландшафтах, сформировавшихся после отступления ледника и приледниковых вод [Малоземова, 2012]. Озеро Лесное является обычным для зонального таежного типа геохимических ландшафтов кислородным водоемом, которые характерны для гумидной зоны.

Озеро Лесное находится в Харовском муниципальном округе центральной части Вологодской области, где природные условия являются типичными для ее территории, расположенной на границе подзон средней и южной тайги. С географическим положением Харовского округа, обеспечивающим его доступность для исследователей, связано достаточно опубликованных сведений, касающихся разных направлений изучения ландшафтов [Озерные..., 1981; Авдошенко и др., 1984; Харовск..., 2004; Природа..., 2007; Болотова, 2022]. Это дает возможность выделить характерные черты озер, расположенных в среднетаежных ландшафтах на моренной и озерно-ледниковой низменной равнине, приуроченных к краевым зонам покровного оледенения. В рассматриваемом среднетаежном ландшафте преобладают малые мелководные озера, такие как озеро Лесное, с небольшими водосборными бассейнами среди заболоченных низких равнин.



Рис. 1. Географическое положение озера Лесного (А) в среднетаежном ландшафте Сухоно-Двинской ландшафтной области [Атлас..., 2007] и спутниковый снимок (В)

Fig. 1. Geographical location of the studied lake (A) in the middle taiga landscape of the Sukhona-Dvina landscape region [Skupinova, 2007] and a satellite image (B)

Происходит заиление озер, их зарастание как по дну, так и сплавиной, что неблагоприятно для рыбозаповедения. Известно, что зональный гумидно-фульвокислотный тип лимногенеза направлен в сторону дистрофикации, гумификации и формирования типичных окунево-плотвичных ихтиоценозов [Озерные..., 1981; Жаков, 1984]. Наличие антропогенных источников поступления фосфора резко ускоряет темпы эвтрофирования мелководных малых озер.

В этом плане исследование озера Лесного представляет особый интерес, так как оно находится в удаленной от населенных пунктов труднодоступной заболоченной местности. Однако озеро активно посещается рыбаками-любителями, на берегу поставлены вагончики для ночевки, завезено много моторных лодок. Низкие берега окружены лесами, вплотную к берегу подходит болото, что затрудняет проезд и создает экономический риск для рыбохозяйственного освоения водоема при необходимости строительства дороги в этой местности.

Озеро Лесное характеризуется незначительной площадью водосбора – 27,3 км<sup>2</sup>. В водоем впадает ручей Черный и вытекает река Сохта длиной 10 км. Котловина озера имеет остаточное ледниковое происхождение, связанное с заполнением понижений рельефа талыми

водами отступающего ледника. Для уточнения географического положения озера Лесного использовались картографические материалы, в ходе полевых исследований установлены координаты озера с помощью GPS-навигатора. Для учета антропогенного воздействия выявляли освоение берегов и степень трансформации водосбора. Площадь сплавины вычисляли по общедоступным спутниковым снимкам интернет-сервиса «Bing.Maps» в координатной привязке. Морфометрические параметры – длину озера и максимальную ширину вычисляли по установленным на месте крайним точкам с координатной привязкой. Среднюю ширину озера, изрезанность береговой линии, коэффициент глубинности и относительной глубины рассчитывали по общепринятым методикам [Богословский, 1960; Определение..., 2018]. При помощи картографических материалов в программе qGIS, созданных на основе спутниковых снимков, вычисляли длину береговой линии, коэффициенты формы и удлиненности котловины озера. Исходя из морфологических особенностей водоема определена сетка батиметрических профилей в изобатах и горизонталях в масштабе 1:2000 с сечением изолиний 1 м. Выполнены промеры глубин эхолотом по продольным профилям с координированием

при помощи GPS-навигатора. По результатам батиметрической съемки вычислен объем воды озера и средний уклон дна.

Время проведения экспедиции в августе 2022 г. было выбрано для исследования состояния озера в период наибольшей вегетации, что важно для оценки процессов эвтрофирования, нежелательных для рыбоводства. Площадь зарастания озера вычисляли по реперным точкам в координатной привязке, нанесенным на карту озера. Выявлялись доминирующие макрофиты, их таксономическая принадлежность устанавливалась с помощью определителя [Орлова, 1997]. Расположение станций отбора проб (рис. 2) учитывало характер котловины, глубину и биотопическое разнообразие озера.

Общий объем собранного материала составил 34 пробы. Гидрохимические пробы (5 л) были отобраны на двух станциях: в зарослях около сплавины (ст. 1) и в центре озера в зоне открытой воды (ст. 7). Для физико-химического анализа 8 проб грунтов были отобраны на станциях, из которых пять (ст. 1, 2, 3, 4, 5) охватывали разные зарослевые биотопы и три (ст. 6, 7, 8) – зону открытой воды. На этих же восьми станциях собран гидробиологический материал в объеме 24 проб, включая фитопланктон, зоопланктон, зообентос (по 8 проб каждой группы гидробионтов).

Пробы донных отложений собирались с использованием ковша Ван-Вина согласно

ГОСТ 17.1.5.01. Использовали анализатор «Эксперт-001» для определения pH потенциометрическим методом и электропроводности – кондуктометрическим методом. Гигролажность донных отложений анализировалась согласно ГОСТ 5180-84. Содержание тяжелых металлов определялось в аккредитованной лаборатории по стандартным методикам. Выявление физико-химических свойств воды включало на каждой станции: определение прозрачности при помощи диска Секки, активной реакции среды pH-метром, измерение температуры и содержания растворенного кислорода оксиметром. Гидрохимические пробы анализировались по стандартным методикам в сертифицированной испытательной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Вологодский». Определялось 25 показателей. Среди них мягкость и сухой остаток; содержание гидрокарбонатов, хлоридов, сульфатов, общей щелочности, что отражает устойчивость озерной экосистемы к скрытому закислению. Выявлялись показатели, связанные с процессом гумификации: цветности, мутности и содержания взвешенных веществ. Уровень органического загрязнения озер оценивался с помощью показателей биологического потребления кислорода, перманганатной окисляемости, химического потребления кислорода и его содержания в воде озера. Устанавливалось содержание в воде биогенных элементов, включая общий фосфор, аммонийный азот, нитрит

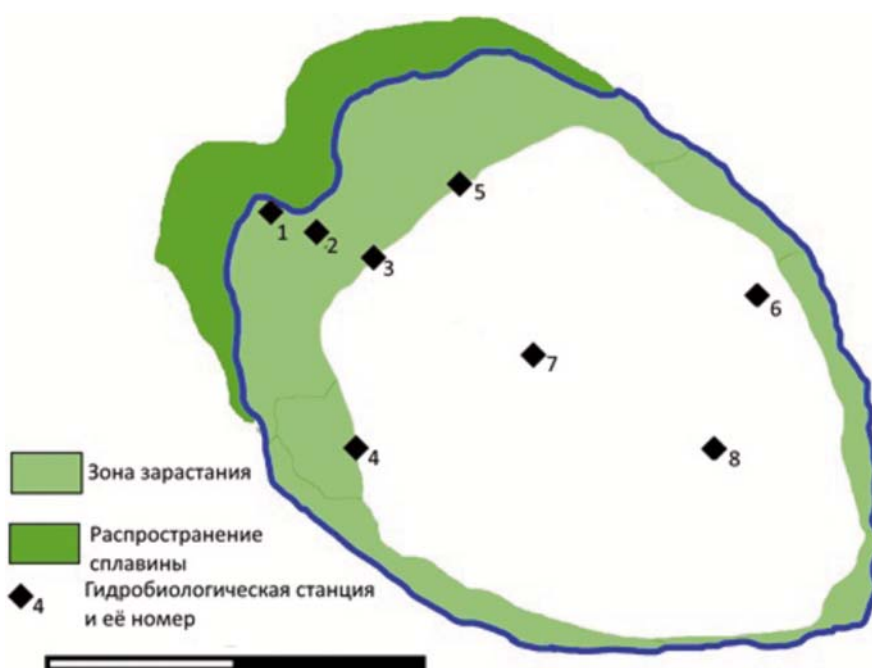


Рис. 2. Схема расположения станций отбора проб на озере Лесном  
Fig. 2. Layout of the sampling stations on Lake Lesnoye

и нитрат-ион, с поступлением которых связана продвинутость процессов эвтрофирования. Из загрязняющих веществ определялось содержание в воде наиболее распространенных на территории региона тяжелых металлов (марганец, медь, железо, цинк, свинец) и органических веществ (анионные активно-поверхностные вещества, нефтепродукты).

Гидробиологические пробы были отобраны в требуемой методикой повторности в зоне открытой воды на участках разной глубины и в прибрежной зоне у края сплавины, в разных биотопах зарослевой зоны. Сбор и обработку гидробиологических проб осуществляли в соответствии со стандартными методиками [Методы..., 2024]. Отбор проб фитопланктона (объемом 2 литра, в поверхностном слое) проводился с помощью горизонтального батометра Ван-Дорна. Пробы фиксировались раствором Люголя. Камеральная обработка проб выполнялась по общепринятой методике с использованием определителей [Паламарь-Мордвинцева, 1982; Süßwasserflora..., 1991a, b]. Для сбора проб зоопланктона применялась количественная сеть Джеди (диаметр верхнего кольца 25 см, сито № 70): в пелагиали отбирали протягиванием сети от дна до поверхности, в зарослях – профильтровывали 50 л. Пробы фиксировались 4% раствором формалина и обрабатывались в лабораторных условиях. Видовая принадлежность организмов устанавливалась с использованием [Определитель..., 2010]. Рассчитывалась общая численность (тыс. экз./м³) и биомасса (г/м³) зоопланктона, доля таксономических групп. Пробы макрозообентоса отбирали ковшом Ван-Вина с площадью захвата 0,002 м² в трех повторностях. Грунт промывался в сетном мешке из газа № 17, пробы фиксировались формалином. Камеральная обработка проб производилась в лаборатории счетно-весовым методом, идентификация осуществлялась до наименьшего определяемого таксона [Определитель..., 2016]. Данные по численности и биомассе бентоса пересчитывались на 1 м² поверхности дна. Для выявления состава рыбного населения применялась постановка жаберных сетей (одностенные, с ячейей 27–32 мм) в открытой воде и вдоль зарослей, проводился опрос рыбаков-любителей. Пойманные рыбы (42 экз.) обрабатывались согласно методике ихтиологических исследований для использования в аквакультуре [Плотников и др., 2018].

Методологический алгоритм проведенного комплекса исследований выстроен в рамках экосистемного подхода, с учетом происхождения водоема, влияния водосбора на формирование

условий обитания организмов в озере, выявления нежелательных процессов, ухудшающих качество воды, грунтов и всех трофических уровней.

## Результаты и обсуждение

### Морфометрические показатели

Озеро Лесное имеет овальную форму, блюдцеобразное ложе, ровный рельеф дна с простой конфигурацией в форме неправильной воронки, углубление которой смещено в юго-восточную часть озера (рис. 3). Длина озера ( $L$ ) равна 1 950 м, максимальная ширина ( $B_{\text{макс}}$ ) – 1 470 м; средняя ширина ( $B_{\text{ср}}$ ) – 1 070 м. Длина береговой линии ( $l_0$ ) составила 5 660 м, изрезанность слабая ( $m = 1,10$ ). Значение коэффициента удлинённости котловины – 1,88. Объем ( $V_{\text{ос}}$ ) воды составляет 2,59 млн м³. Максимальная глубина ( $H_{\text{макс}}$ ) озера равна 4,9 м, а средняя – 1,24 м. Участки с глубинами 1–2 метра занимают 74 % от площади зеркала. Коэффициент формы котловины ( $\Phi$ ) равен 1,81, средний уклон дна водоема ( $l$ ) всего 0,8°. Коэффициент глубинности ( $b$ ) 0,25 и низкий коэффициент относительной глубины (0,010) отражают слабую укрытость озерной котловины и крайне низкую степень стратифицированности водной массы. Высокий показатель открытости зеркала оз. Лесного (0,809) определяет интенсивный контакт вод озера с атмосферой.

По морфологическим параметрам озеро Лесное можно классифицировать как мелководное по глубине и малое по площади. Отметим, что применение садковой аквакультуры связано с размещением рыбоводной инфраструктуры при глубине не меньше 3 м, а оптимальной – не менее 5 м [Экологический..., 2013], тогда как в озере Лесном основная площадь акватории имеет глубины менее 2 метров, что является препятствием для установки садков. С точки зрения пастбищного выращивания рыб озеро Лесное имеет достаточную площадь 210 га, но жилую зону для рыб уменьшает обширная сплавина (12,5 % от площади озера). В остальной части водоема жилая зона ограничивается глубинами 0,5–1,3 м до слоя жидкого ила метровой толщины, что также препятствует и неводному облову, который применяется в пастбищной технологии аквакультуры.

### Донные отложения и физико-химические свойства воды

Интенсивное илообразование служит лимитирующим фактором использования водоема в целях аквакультуры. Мощность жидких илов

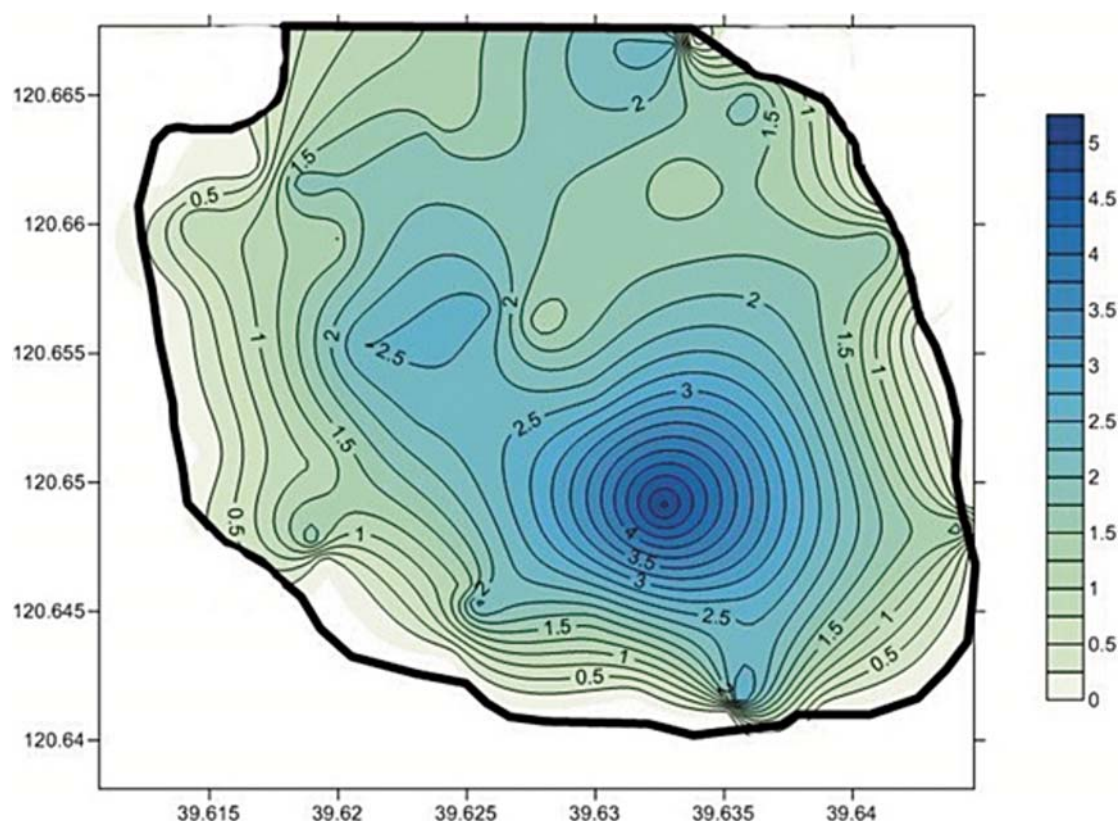


Рис. 3. Картограмма батиметрии оз. Лесного (глубина в метрах)

Fig. 3. Bathymetric map of Lake Lesnoye (depth in meters)

достигает 1 метра, что связано с поступлением аллохтонного органического вещества с низких заболоченных берегов и с притоком вытекающей из болота р. Черной. В активно зарастающем озере значительный вклад в илообразование вносит и автохтонная органика за счет отмирания высшей водной растительности. Свойства ила как тонкодисперсного материала с высокой гигроскопической влажностью 70–78 % определяют в озере Лесном прогрессирование аккумуляционных процессов. Низкие показатели pH донных отложений (4,1–4,2), отражающие потенциальную уязвимость малых среднетаежных озер к закислению, связаны с заболоченностью водосбора. Цвет грунтов от коричневого к черно-серому свидетельствует о высоком уровне гумификации водоема при поступлении болотных вод и о регулярном наличии бескислородных условий. Гнилостный запах проб указывает на протекание анаэробных процессов в донных отложениях озера. В условиях мелководности это стимулируется температурным режимом в летний период при прогревании всей толщи воды из-за отсутствия стратификации. Следует отметить, что температура воды в озере Лесном в период сбора проб в августе составляла 20,5–21,2 °С.

Кроме того, прогревание воды влияет на способность донных отложений поглощать и удерживать загрязняющие вещества. Свойства грунтов с большим содержанием трудно минерализующейся органики при электропроводности до 1,89 и присутствии тяжелых металлов (свинец, цинк, медь, кадмий) повышают уязвимость озера Лесного в плане его токсификации, учитывая, что величины концентраций металлов положительно коррелируют с содержанием илистой фракции. Опасным следствием протекания интенсивных анаэробных процессов служит обнаружение на участке около сплавины сероводорода, губительного для организмов.

Накопление органических веществ, вызывающее дефицит кислорода, подтверждается показателем химического потребления кислорода  $33,6 \pm 6,7$  мг/дм<sup>3</sup>, более чем в 2 раза превышающим ПДК (15 мг/дм<sup>3</sup>) для рыбохозяйственных водоемов; показатель перманганатной окисляемости составлял  $14,4 \pm 1,4$ . В результате постоянного поступления аллохтонной органики с водосбора ухудшается кислородный режим, являющийся основным лимитирующим фактором для осуществления рыбоводных мероприятий. Кроме того,

значительная часть более высокого восточного берега, покрытого лесом, подмывается, и побережье усеяно затонувшей древесиной, на разложение которой требуется кислород. Периодическое цветение воды (установлено по опросным данным) также ухудшает кислородный режим, создавая заморные ситуации. В период открытой воды насыщение кислородом происходит за счет интенсивного контакта вод озера с атмосферой благодаря открытости зеркала (коэффициент 0,809). Однако даже в этот период в поверхностном слое содержание кислорода не превышало  $6,2 \pm 1,0$  мг/дм<sup>3</sup> при пороговой концентрации 6,0 мг/дм<sup>3</sup> для многих видов рыб. Соответственно, в подледный период велика вероятность заморных явлений, что и подтвердилось опросом рыбаков-любителей и местных жителей.

Заилению озера Лесного также способствует замедленный водообмен при обеспечении проточности только притоком из болотного ручья и стоком в малую реку Сохту. В этих участках озера показатели скорости течения всего 0,006 м/сек. Динамика водных масс озера Лесного определяется ветровым перемешиванием, что вызывает повышение мутности воды, являющейся неблагоприятным фактором для выращивания рыб. Активность ветрового перемешивания водных масс связана и со слабой укрытостью озерной котловины, чему соответствует рассчитанный низкий коэффициент относительной глубины водоема (0,01). В условиях мелководности наличие жидкого ила по всей площади дна озера даже в безветренную погоду создает высокую мутность воды. Повышение содержания взвешенных веществ как грубодисперсных примесей в озерной воде снижает освещенность, прозрачность, создает неблагоприятные условия для гидробионтов-фильтраторов и рыб. Из-за наличия большого слоя жидких илов в озере Лесном даже при штилевой погоде в период отбора проб в поверхностном слое содержание взвешенных веществ было  $1,48 \pm 0,27$  мг/дм<sup>3</sup>, а прозрачность не превышала 1,2 м. Следовательно, любое интенсивное ветровое перемешивание в условиях мелководности озера вызовет значительное увеличение мутности воды. Свой вклад во взмучивание воды вносит любительский лов при использовании моторных лодок.

Вода озера Лесного по химическому составу относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Высокое содержание гидрокарбонатов ( $54,3$  мг/дм<sup>3</sup>) по отношению к содержанию ионов более сильных кислот хлоридов

и сульфатов (менее 10 мг/дм<sup>3</sup>) отражает достаточную устойчивость озерной экосистемы к закислению. Это согласуется с показателем общей щелочности (около  $0,9 \pm 0,11$  моль/дм<sup>3</sup>) как способности нейтрализовывать кислоты и значением нейтральной реакции среды (рН 7). Следует отметить такие неплохие свойства воды, как мягкость (1,1 град.) и показатель сухого остатка (около  $102,9 \pm 9,8$  мг/дм<sup>3</sup>), характеризующий общее содержание растворенных в воде нелетучих минеральных и частично органических соединений. Однако заболачивание берегов, при котором происходит поступление в воду трудноокисляемых гуминовых кислот, определяет процесс гумификации, что неблагоприятно для рыборазведения. Признаком гумификации служит высокая цветность воды в оз. Лесном ( $36,5 \pm 7,3$  град.). Исследования других малых озер показали, что поступление органического вещества, придающего воде желтоватый или коричневый цвет, негативно влияет на режим освещенности в водоеме, снижая его биологическую продуктивность [Karlsson et al., 2009].

На берегах труднодоступного озера Лесного нет постоянных локальных источников поступления органических и биогенных веществ за счет хозяйственной деятельности. Это отражают показатели БПК<sub>5</sub> (менее 1,0 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) и содержание общего фосфора (менее 0,02 мг/дм<sup>3</sup>), которые не превышают норму. Однако поступление аллохтонной органики с последующей нитрификацией повышает содержание азота, другого основного биогенного элемента, ускоряющего процесс эвтрофирования. Так, содержание нитритов  $0,076 \pm 0,014$  мг/дм<sup>3</sup> практически достигало порога ПДК даже в период наибольшей вегетации при интенсивном потреблении продуцентами.

Другим негативным фактором является поступление токсических веществ. Среди обнаруженных в воде озера Лесного тяжелых металлов – свинец, цинк, медь, железо, марганец. Только содержание последнего ( $0,013 \pm 0,004$  мг/дм<sup>3</sup>) превышало в 1,3 раза ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Повышенное содержание марганца, железа и меди часто отмечается в озерах Вологодской области при высоком кларке этих металлов в почвах. В то же время присутствие в воде свинца и цинка, несмотря на удаленность озера от центров промышленных выбросов, очевидно, объясняется аэротехногенным переносом. Обнаружение в воде нефтепродуктов ( $0,028 \pm 0,01$  мг/дм<sup>3</sup>) и анионных поверхностно-активных веществ ( $0,106 \pm 0,034$  мг/дм<sup>3</sup>) явно связано с моторными лодками рыбаков-любителей.

Лимитирующим фактором для использования озера Лесного в целях аквакультуры является его зарастание, в пространственной картине которого наиболее выделяется северо-западная часть с обширной сечиной и доминированием тростника. Ее площадь, около 370 м<sup>2</sup>, составляет 12,5 % от площади зеркала озера, а объем воды под сечиной оценивается в 87,7 тыс. м<sup>3</sup> (3,3 % от объема озера). Вдоль остальных берегов сечина встречается отдельными пятнами. Около 30 % дна озера заросло высшей водной растительностью с доминированием хвоща приречного. К северо-западной части озера приурочены самые обширные ассоциации макрофитов из хвоща приречного и кубышки желтой. В открытой зоне вдоль берега пояс растительности выражен слабо (менее 0,5 м). Основными структурными элементами зарослей макрофитов являются гелофиты – тростник и хвощ приречный, нейстофиты (плейстофиты) – кубышка желтая, гидрофиты (гидатофиты) – рдест блестящий и пронзеннолистный. Наличие выраженной зоны открытой воды и зоны зарастания определяет особенности биотопов и представленность в них фитопланктона, зоопланктона и зообентоса.

Фитопланктон отличался снижением показателей численности в зарослевых ассоциациях и повышением в зоне открытой воды (рис. 4). Минимальные значения численности (7,1 млн кл./л) отмечены на участке около сечины, а максимальные (12,3 млн кл./л) – в зоне открытой воды в центральной части озера, в основном за счет развития цианопрокариот.

Известно, что взаимоотношения высшей водной растительности и фитопланктона как первичных продуцентов не ограничиваются только конкуренцией за биогенные элементы, но и связаны с эффектом аллелопатии [Садчиков, Кудряшов, 2004]. В частности, выявлена способность кубышки желтой выделять в воду большое количество жирных кислот и фталатов, которые оказывают угнетающий эффект на фитопланктонное сообщество [Курашов и др., 2014].

Таксономический состав фитопланктона озера Лесного был представлен видами из пяти отделов водорослей: диатомовые, зеленые, цианопрокариоты, криптофитовые и золотистые. Основу видового богатства составляли первые три группы. К массовым видам среди цианопрокариот относились *Anabaena flos-aquae* и *A. lemmermanii*, которые вызывают опасное «цветение» воды. Среди диатомей зарегистрированы следующие виды: *Achnanthes* sp., *Amphora* sp., *Aulacoseira subarctica*, *Cyclotella meneghiniana*, *Cymbella* sp., *Epithemia sorex*, *Gomphonema angustatum*, *Stephanodiscus minutulus*, *Tabellaria flocculosa*, *Fragilaria capucina*. Отдел зеленые водоросли представляли *Chlamydomonas* sp., *Scenedesmus arcuatus*, *Tetraspora cylindrica*, *Cosmarium formosulum*, *Monoraphidium arcuatum*.

В структуре фитопланктонного сообщества по численности доминировали мелкие формы водорослей из отдела цианопрокариот. К субдоминантам относились представители диатомовых водорослей, гораздо меньшую численность имели зеленые, криптофитовые и золотистые водоросли. Биомасса фитопланктона в среднем на 48,7–75,6 % была сформирована диатомовыми водорослями, что характерно для северных мелководных озерных экосистем.

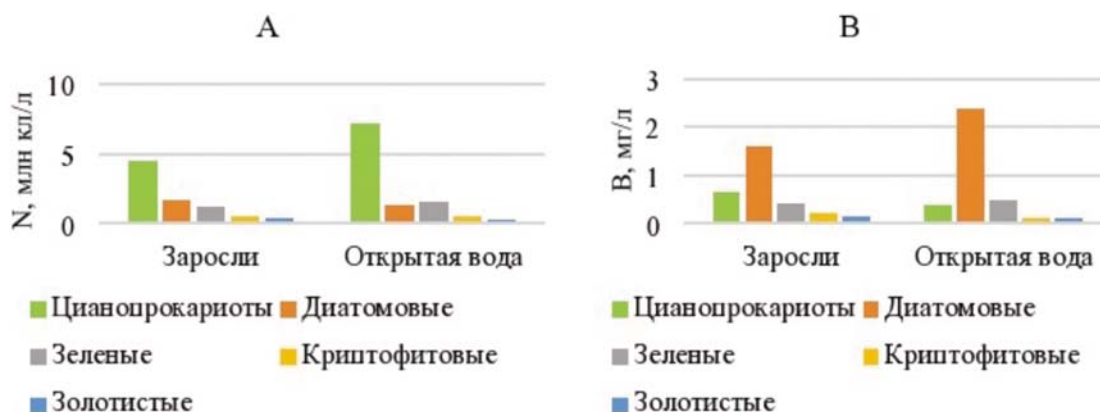


Рис. 4. Средняя численность (А) и биомасса (В) фитопланктона озера Лесного  
Fig. 4. Average density (A) and biomass (B) of phytoplankton in Lake Lesnoye

Значительную долю в биомассу вносили также представители зеленых водорослей и цианопрокариот (рис. 4). Средние значения биомассы фитопланктона в озере Лесном составляли 3,1 мг/л, что позволяет отнести водоем к мезотрофно-эвтрофному статусу. Следует отметить, что в озере обнаружены виды из рода *Microcystis*, способные выделять токсины; их накопление в рыбах опасно и для человека, учитывая развитие любительского лова.

Для зоопланктоценоза озера Лесного зарослевая зона играет структурообразующую роль, как и для других зарастающих озер. В зарослевой зоне численность и биомасса зоопланктона гораздо выше, чем в открытой воде (рис. 5).

Известна зависимость уровня развития и видовой структуры зоопланктона от гетерогенности структурной композиции зарослей зоны, развития макрофитов, их морфологического строения, что способствует формированию разнообразия экологических условий [Kuczyńska-Kippen, 2006; Курбатова и др., 2019 и др.].

В наиболее распространенных ассоциациях хвоща приречного в местах вкрапления пятен смешанных зарослей кубышки желтой и рдестов при увеличении гетерогенности местообитаний отмечена наибольшая численность зоопланктона – 78,3 тыс. экз./м<sup>3</sup> и биомасса – 1,6 г/м<sup>3</sup>. Однако средний показатель численности зоопланктона составил около 57 тыс. экз./м<sup>3</sup>, а биомасса – 0,9 г/м<sup>3</sup>, что характеризует озеро Лесное как малокормный водоем и является лимитирующим фактором для пастбищной аквакультуры.

В составе зоопланктона озера Лесного отмечено 29 видов, среди них ветвистоусых ракообразных – 15, коловраток – 8, веслоногих ракообразных – 6. Массовыми видами зоопланктона в летний период были: среди коловраток *Asplanchna priodonta*, *Keratella cochlearis*; среди клadoцер *Sida crystallina*, *Bosmina coregoni*, *Daphnia cucullata*, *Ceriodaphnia laticaudata*; среди copeпод *Mesocyclops leuckarti*, *Eudiaptomus gracilis*.

Основной вклад в видовое разнообразие зоопланктона вносит зарослевая зона за счет ветвистоусых ракообразных. Пространственная структура зоопланктона в зарослях зависит от плотности макрофитов, наличия открытых участков и ветрового фактора. Так, в широко распространенных и разреженных зарослях хвоща помимо фитофильных клadoцер (*Acroporus harpae*, *Biapertura affinis*, *Pleuroxus truncatus*, *Chydorus sphaericus*) встречаются пелагические виды *D. cucullata*, *E. gracilis*. Кроме того, на границе с зоной открытой воды обнаружены представители крупных хищных клadoцер *Lepidodora kindtii* и редко встречающийся в малых озерах области *Bythotrephes* sp. В одновидовом биотопе хвоща приречного отмечалось разнообразие взрослых циклопов, науплиальных и copeподитных стадий, среди них типичные обитатели северных озер *Paracyclops affinis*, *Diacyclops bicuspidatus*, *Eucyclops serrulatus*. Также отмечена значительная численность планктонных циклопов *M. leuckarti* и единичные особи *Thermocyclops oithonoides*. В биотопе со смешанными ассоциациями (хвощ приречный, кубышка желтая и рдесты) помимо доминирующих по биомассе *S. crystallina* и *E. serrulatus*

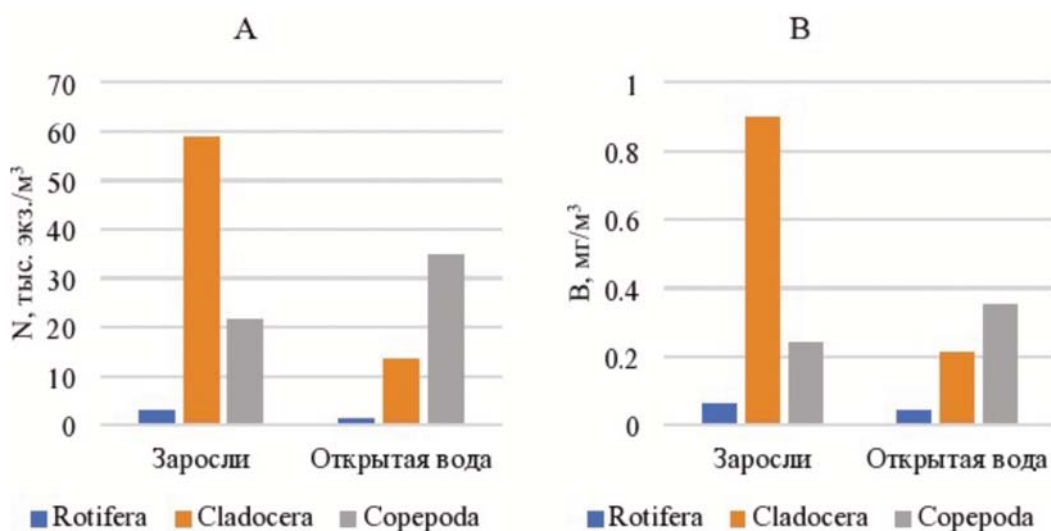


Рис. 5. Средняя численность (А) и биомасса (В) зоопланктона оз. Лесного

Fig. 5. Average density (A) and biomass (B) of zooplankton in Lake Lesnoye

встречались тяготеющие к пелагиали виды: *K. cochlearis*, *B. coregoni*, *D. cucullata*, *E. gracilis*.

В зоне открытой воды зоопланктон носил копеподный характер с доминированием *E. gracilis* и *M. leuckarti*. Среди коловраток преобладал по биомассе хищный крупный вид *A. priodonta*, а по численности – пелагические виды *K. cochlearis* и *K. quadrata*. К массовым видам кладоцер относился *D. cucullata*. Среди эвритопных видов в зоне открытой воды отмечались *C. laticaudata*, *Bosmina longirostris*, *C. sphaericus*. Основными факторами формирования зоопланктоценоза открытой воды были однообразие условий обитания и ветровое перемешивание.

Зарослевая зона озера Лесного служит основным местообитанием и для донных организмов (рис. 6). В пробах обнаружены олигохеты, моллюски, личинки поденок, стрекоз, мокрецов, типулин, жуки и хирономиды. В илах открытой воды отмечается бедность видового состава макробентоса. В зарослевой зоне доминируют олигохеты, на которые приходится около трети общей численности и биомассы, к субдоминантам относятся моллюски. Значительной численностью (29 %) отличались поденки, а личинки стрекоз из-за крупных размеров вносили заметный вклад (21 %) в общую биомассу.

На участках открытой воды обнаружены только поденки и моллюски. Пространственная картина видового состава и количественных показателей макрозообентоса зависела от состояния грунтов, структуры макрофитов, доли крупных форм бентосных организмов и соответственно отличалась в самих зарослях и зоне

открытой воды (рис. 6). Наименьшая биомасса донных животных 0,06 г/м<sup>2</sup> при численности 200 экз./м<sup>2</sup> была на участке около сплавины, где отмечались неблагоприятные условия для развития макробентоса ввиду анаэробных процессов в черно-серых илах с растительными остатками и сернистым запахом. К доминирующей группе относились личинки мокрецов: 60 % от общей численности при биомассе 18,7 % от общей биомассы зообентоса. Хирономиды, как более крупные формы, преобладали по биомассе, составляя 56,3 % от общей биомассы бентоса. На третьем месте по значимости в структуре макрозообентоса находились олигохеты.

Наибольшая биомасса макрозообентоса 1,6 г/м<sup>2</sup> при численности 2040 экз./м<sup>2</sup> зарегистрирована на заиленном детрите с растительными остатками в зарослях смешанной ассоциации из хвоща приречного, кубышки желтой и рдестов. Здесь были встречены представители семи систематических групп: олигохеты, моллюски, жуки, личинки стрекоз, поденок, комаров-звонцов и мокрецов. В доминирующую группу входили олигохеты: 45,1 % от общей численности и 51,4 % от общей биомассы зообентоса. Доля поденок в общей численности достигала 23,5 %. Немногочисленные моллюски, ввиду крупных размеров их представителей, входили в доминирующую группу по биомассе.

В однообразных условиях разреженных зарослей одновидовой ассоциации хвоща приречного с жидкими илами коричневого цвета наблюдалось резкое обеднение видового

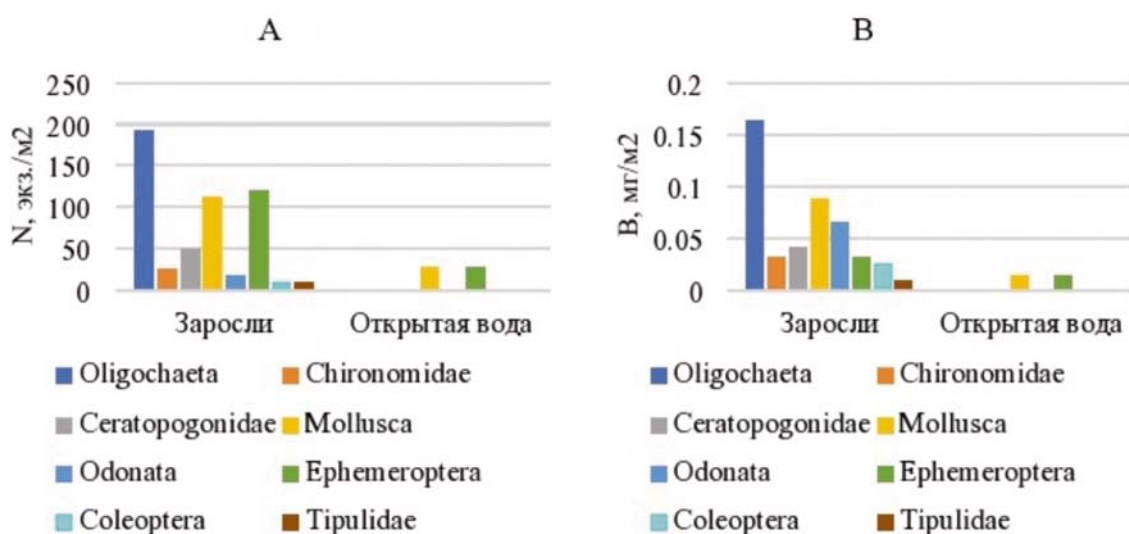


Рис. 6. Средняя численность (А) и биомасса (В) зообентоса оз. Лесного  
Fig. 6. Average density (A) and biomass (B) of zoobenthos in Lake Lesnoye

состава макробентоса и снижение его количественных показателей. Общая биомасса представителей трех систематических групп – моллюсков, личинок стрекоз и поденок – составляла 0,36 г/м<sup>2</sup> при численности 200 экз./м<sup>2</sup>. Из-за крупных размеров доминировали по биомассе личинки стрекоз – 55,6 %, а также моллюски – 33,3 % от общей биомассы зообентоса. К доминантам по численности относились поденки, составляя 40 % от общей численности бентоса. В прибрежном биотопе на границе зарослей хвоща и открытой воды с черно-серыми илами с растительными остатками и сернистым запахом обнаружены только моллюски (половина общей биомассы и 67 % от общей численности зообентоса) и личинки типулин. Здесь биомасса снижалась до 0,08 г/м<sup>2</sup> при численности бентосных организмов 120 экз./м<sup>2</sup>. В аналогичном биотопе в центральной части озера, где отмечены желто-серые илы с гнилостным запахом, количественные показатели зообентоса были еще более низкие. Равную долю в общую биомассу макрозообентоса (0,076 г/м<sup>2</sup> при численности 80 экз./м<sup>2</sup>) вносили мокрецы и поденки.

В открытой воде с жидкими илами коричневого цвета и присутствием гнилостного запаха моллюски и личинки поденок также имели низкую биомассу 0,08 г/м<sup>2</sup> при численности 160 экз./м<sup>2</sup>. На двух других станциях открытой воды в центральной части озера бентосных организмов в пробах не обнаружено.

Таким образом, илонакопление в озере Лесном отразилось на крайне низком уровне развития зообентоса, средняя биомасса которого не превышала 0,1 г/м<sup>2</sup>. Помимо того, в его составе преобладают труднодоступные для рыб кормовые организмы, что также является лимитирующим фактором для пастбищной технологии выращивания рыб.

Озеро Лесное – типичный окунево-плотвичный малый водоем заболачивающихся среднетаежных ландшафтов. Окунь преобладал как в исследовательских, так в любительских уловах, что отражает его более многочисленную популяцию в озере. Данный вид может обитать в сильно дистрофизированных озерах с бедной кормовой базой за счет способности к каннибализму. Окунь толерантен к закислению воды и при сукцессии озер в сторону гумификации остается единственным видом [Жаков, 1984].

У исследованных экземпляров окуня, плотвы и щуки наполнение желудочно-кишечного тракта колебалось от 0 до 5 баллов, но у большинства рыб составляло 1–2 балла, степень ожирения внутренностей была в пределах 1–4 балла, преобладали особи с показателями 1–2 балла. Эти невысокие показатели отражают

неблагоприятные условия обитания, влияющие на откорм рыб, особенно молоди, при низком уровне развития зоопланктона и зообентоса. В результате формируются тугорослые популяции, что демонстрирует размерно-возрастная структура уловов. Так, окунь в возрасте 2+–8+ лет имел длину 9–20 см и массу 70–184 г. Длина плотвы в возрасте 4+–7+ была 13–19 см при массе 37–155 г, а щука в возрасте 3+–4+ достигала длины всего 26–32 см и массы 270–330 г. Таким образом, кормовые условия озер не соответствуют вселению новых видов, что подтверждается состоянием рыбного населения. Присутствие же щуки как крупного хищника препятствует применению технологии пастбищного рыбоводства, связанного с выпуском мелкого рыбопосадочного материала.

## Заключение

Основным теоретическим положением методологического алгоритма исследования озера Лесного служило представление о генезисе территории в краевых зонах покровного оледенения Северо-Запада, определяющем особенности морфологии и современного состояния озер как структурных элементов ландшафта. Учет ландшафтной обусловленности лимнологических процессов позволил выделить ключевые показатели комплексных исследований мелководного малого оз. Лесного как модельного водоема, типичного для широко распространенных среднетаежных ландшафтов. При планировании использования малых озер в целях аквакультуры следует учитывать общую направленность лимнологических процессов, создающих комплекс лимитирующих факторов для технологий садкового и пастбищного выращивания рыб. Показано, что с илонакоплением при поступлении с болотного водосбора трудноразлагаемой органики связана гумификация и дистрофикация малых озер, где создаются неблагоприятные условия обитания для рыб.

Данную закономерность подтвердили исследования на территории Харовского округа других малых водоемов, несмотря на отличия в их происхождении и морфологии. Это касается оз. Сохтинского подпрудного провального происхождения с очень малой площадью 5,9 га с преобладанием мелководных участков. Водоем представляет собой расширение вытекающей из оз. Лесного реки Сохты с накоплением илов в воронке глубиной 14,5 м [Болотова и др., 2025]. Озеро Мухинское, расположенное в соседнем Харовском моренном холмистом возвышенном среднетаежном ландшафте, как и озеро Лесное, относится к остаточным

последнеледниковым водоемам. Озеро также имеет овальную форму, развитую сплаvinу, но значительно меньшую площадь зеркала 8 га, а также иную форму котловины с глубиной в центральной части озера около 18 м, заполненной сапропелем. В обоих озерах, как и в оз. Лесном, происходит интенсификация процессов заиления, зарастания, цветения воды, закисления грунтов, ухудшения газового режима, снижения уровня развития кормовой базы [Арашин, 2024]. Таким образом, результаты исследования модельного водоема возможно аппроксимировать на другие водоемы среднетаежных ландшафтов в рамках адекватного выбора и планирования использования водного фонда в целях аквакультуры.

В отношении освоения мелководных малых озер следует учитывать их быструю трансформацию при любом дополнительном воздействии. Поэтому если современное состояние позволяет использовать озера в целях аквакультуры, то неизбежны экологические риски пролонгированного негативного влияния: усиление загрязнения водоемов, распространение заболеваний рыб, а также возникновение проблемы «генетического загрязнения» и саморасселения [Павлов, Махров, 2020]. Помимо того, использование водных объектов в целях аквакультуры требует учета других видов антропогенной нагрузки и выявления социально-экономических рисков.

## Литература

- Авдошенко Н. Д., Комиссаров В. В., Ляпкина А. А., МаксUTOва Н. К. Изучение природы административного района (на примере Харовского района Вологодской области). Вологда: ВГПИ, 1984. 58 с.
- Арашин С. Ю. Зоопланктоценоз малого лесного озера Мухинского (Харовский округ Вологодской области) // Исследования Русского Севера: Материалы VIII Всерос. конф. (Вологда, 20–24 марта 2024 г.). Вологда, 2024. С. 451–457.
- Атлас Вологодской области: учебное пособие / Ред. Е. А. Скупинова. Череповец: Порт-Апрель, 2007. 108 с.
- Багров А. М., Мамонтов Ю. П. Анализ некоторых аспектов «Стратегии развития аквакультуры России на период до 2020 года» // Рыбное хозяйство. 2008. № 2. С. 18–23.
- Богословский Б. Б. Озероведение. М.: Изд-во МГУ, 1960. 335 с.
- Болотова Н. Л., Лопичева О. Г., Мухин И. А., Арашин С. Ю. К вопросу использования в целях аквакультуры малых озер среднетаежных ландшафтов Вологодской области // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы III Междунар. конф. 2025. С. 600–605.
- Болотова Н. Л. Направления исследований ландшафтов Вологодской области на примере Харовского муниципального района // Исследования Русского Севера: Материалы VI Всерос. конф. (Вологда, 6–10 апреля 2022 г.). Вологда, 2022. С. 9–13.
- Воробьев Г. А. Ландшафтная обусловленность лимногенеза и антропогенное эвтрофирование малых озер // Антропогенные изменения экосистем малых озер (причины, последствия, возможность управления). Часть 1. СПб., 1991. С. 79–82.
- Жаков Л. А. Формирование и структура рыбного населения озер Северо-Запада СССР. М.: Наука, 1984. 144 с.
- Козлов А. В. Типизация и биоиндикация малых водоемов фермерских хозяйств для их рыбохозяйственного использования: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2005. 19 с.
- Курашов Е. А., Крылова Ю. В., Митрукова Г. Г., Чернова А. М. Летучие низкомолекулярные метаболиты водных макрофитов, произрастающих на территории России, и их роль в гидрозкосистемах // Сибирский экологический журнал. 2014. № 4. С. 573–591.
- Курбатова С. А., Лаптева Н. А., Быкова С. Н., Ершов И. Ю. Водные растения как фактор, меняющий трофические связи и структуру сообществ зоопланктона и микроперифитона // Известия РАН. Серия биологическая. 2019. № 3. С. 302–311. doi: 10.1134/S0002332919030056
- Малоземова О. В. Морфометрическая характеристика озер в различных ландшафтах Востока Ленинградской области // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2012. № 144. С. 112–121.
- Методы гидробиологических исследований внутренних вод / Ред. А. В. Крылов. Борок: Филигрань, 2024. 557 с.
- Озерные ресурсы Вологодской области / Ред. А. А. Ляпкина, Н. Н. Шевелев. Вологда: ВГПИ, 1981. 151 с.
- Определение гидрографических характеристик картографическим способом: рекомендации Р 52.08.874-2018 / Министерство природных ресурсов и экологии РФ. СПб.: Росгидромет, 2018. 172 с.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Ред. В. Р. Алексеев. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 495 с.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос / Ред. С. Я. Цалолыхин. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. 457 с.
- Орлова Н. И. Определитель сосудистых растений Вологодской области. Вологда: Русь, 1997. 264 с.
- Павленко В. И., Новоселов А. П., Студенов И. И., Семушин А. В., Торцев А. М. Перспективные направления пресноводной аквакультуры на Европейском Севере России // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2(26). С. 105–116. doi: 10.25283/2223-4594-2017-2-105-116
- Павлов Д. С., Махров А. А. Аквакультура и ее влияние на дикие популяции лососевых // Ассоциация сторонников сохранения лососевых видов рыб [Электронный ресурс]. 2020. URL: <https://ru.russiansalmon.org/info/aquaculture/> (дата обращения: 16.09.2025).
- Паламарь-Мордвинцева Г. М. Определитель пресноводных водорослей СССР. Зеленые водоросли. Л.: Наука, 1982. 620 с.

Плотников Г. К., Пескова Т. Ю., Шкуте А., Пу-  
пиня А., Пупиньш М. Основы ихтиологии. Сборник  
классических методов ихтиологических исследова-  
ний для использования в аквакультуре. Даугавпилс:  
Сауле, 2018. 253 с.

Природа Вологодской области / Ред. Г. А. Во-  
робьев. Вологда: Вологжанин, 2007. 434 с.

Садчиков А. П., Кудряшов М. А. Экология при-  
брежно-водной растительности. М.: НИА-Природа,  
РЭФИА, 2004. 220 с.

Степанов М. В., Болотова Н. Л. Рыболовство  
и рыбное хозяйство // Животный мир Вологодской  
области. Вологда: Изд-во ВоГУ, 2021. С. 298–323.

Харовск: Краеведческий альманах. Вологда:  
Русь, 2004. 416 с.

Экологический справочник для рыбоводной  
промышленности Северо-Запада России. Helsinki:  
Nykypaino, 2013. 109 с.

Karlsson J., Byström P., Ask J., Ask P., Persson L.,  
Jansson M. Light limitation of nutrient-poor lake ecosys-  
tems // *Nature*. 2009. Vol. 460. P. 506–509. doi: 10.1038/  
nature08179

Kuczyńska-Kippen N. Zooplankton structure in  
architecturally differentiated macrophyte habitats of  
shallow lakes in the Wielkopolska Region, Poland // *Inter-  
national Journal of Oceanography and Hydrobiology*.  
2006. Vol. 35, no. 2. P. 179–191.

*Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart: Gustav  
Fischer Verlag, 1991a. B. 2, no. 3. 576 s.; 1991b. B. 2,  
no. 4. 437 s.

## References

Alekseev V. R. (ed.). A key to zooplankton and zoo-  
benthos of the freshwater bodies in the European part  
of Russia. Vol. 1. Zooplankton. Moscow: KMK; 2010.  
495 p. (In Russ.)

Arashin S. Yu. Zooplankton of small forest Lake Mu-  
khinskoye (Kharovsky District, Vologda Region). *Issle-  
dovaniya Russkogo Severa: Materialy VIII Vseros. konf.*  
(Vologda, 20–24 marta 2024 g.) = *Research of the Russian  
North: Proceedings of the VIII All-Russ. conf.* (Vologda,  
March 20–24, 2024). Vologda; 2024. P. 451–457. (In Russ.)

Avdoshenko N. D., Komissarov V. V., Lyapkina A. A.,  
Maksutova N. K. Study of the nature of an administrative  
region (based on the Kharovsky District of the Vologda  
Region). Vologda: VGPI; 1984. 58 p. (In Russ.)

Bagrov A. M., Mamontov Yu. P. Analysis of some  
aspects of the *Strategy for the Development of Aqua-  
culture in Russia through 2020*. *Rybnoe khozyaistvo =  
Fisheries*. 2008;2:18–23. (In Russ.)

Bogoslovskii B. B. Limnology. Moscow: MGU; 1960.  
335 p. (In Russ.)

Bolotova N. L. Directions for landscape research in  
the Vologda Region using the Kharovsky Municipal Dis-  
trict as an example. *Issledovaniya Russkogo Severa:  
Materialy VI Vseros. konf.* (Vologda, 6–10 aprelya  
2022 g.) = *Research of the Russian North: Proceedings  
of the VI All-Russian conf.* (Vologda, April 6–10, 2022).  
Vologda; 2022. P. 9–13. (In Russ.)

Bolotova N. L., Lopicheva O. G., Mukhin I. A.,  
Arashin S. Yu. On the issue of using small middle-tai-  
ga landscapes of the Vologda Region for aquaculture

purposes. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya:  
Materialy III Mezhdunar. konf.* = *Lakes of Eurasia: Prob-  
lems and solutions: Proceedings of the III Int. conf.* 2025.  
P. 600–605. (In Russ.)

Determination of hydrographic characteristics by  
the cartographic method: recommendations R  
52.08.874-2018. Ministry of Natural Resources and En-  
vironment of the Russian Federation. St. Petersburg:  
Roshydromet; 2018. 172 p. (In Russ.)

Ecological handbook for the fish farming industry  
of Northwest Russia. Helsinki: Nykypaino; 2013. 109 p.  
(In Russ.)

Golikova N. I. (ed.). Kharovsk: Local history almanac.  
Vologda: Rus'; 2004. 416 p. (In Russ.)

Karlsson J., Byström P., Ask J., Ask P., Persson L.,  
Jansson M. Light limitation of nutrient-poor lake eco-  
systems. *Nature*. 2009;460:506–509. doi: 10.1038/  
nature08179

Kozlov A. V. Typification and bioindication of small re-  
servoirs of farms for their fisheries use: Summary of PhD  
(Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 2005. 19 p. (In Russ.)

Krylov A. V. (ed.). Methods of hydrobiological studies  
of inland waters. Borok: Filigran'; 2024. 557 p. (In Russ.)

Kuczyńska-Kippen N. Zooplankton structure in ar-  
chitecturally differentiated macrophyte habitats of shal-  
low lakes in the Wielkopolska Region, Poland. *Inter-  
national Journal of Oceanography and Hydrobiology*.  
2006;35(2):179–191.

Kurashov E. A., Mitrukova G. G., Krylova J. V.,  
Chernova A. M. Low-molecular-weight metabolites of  
aquatic macrophytes growing on the territory of Rus-  
sia and their role in hydroecosystems. *Contemporary  
Problems of Ecology*. 2014;7(4):433–448. doi: 10.1134/  
S1995425514040064

Kurbatova S. A., Lapteva N. A., Bykova S. N., Yer-  
shov I. Y. Aquatic plants as a factor that changes trophic  
relations and the structure of zooplankton and micro-  
periphyton communities. *Biology Bulletin*. 2019;46(3):  
284–293. doi: 10.1134/S1062359019030051

Lyapkina A. A., Shevelev N. N. (eds.). Lake resources  
of the Vologda Region. Vologda: VGPI; 1981. 151 p.  
(In Russ.)

Malozemova O. V. The morphometric description  
of lakes in the areas of the east of the Leningrad Region.  
*Izvestiya RGPU im. A. I. Gertsena = Bulletin of Herzen State  
Pedagogical University*. 2012;144:112–121. (In Russ.)

Orlova N. I. An identification guide to vascular plants of  
the Vologda Region. Vologda: Rus'; 1997. 264 p. (In Russ.)

Palamar'-Mordvintseva G. M. An identification guide  
to freshwater algae of the USSR. Green algae. Lenin-  
grad: Nauka; 1982. 620 p. (In Russ.)

Pavlenko V. I., Novoselov A. P., Studenov I. I.,  
Semushin A. V., Tortsev A. M. The perspective directions  
of the fresh-water aquaculture in the European north of  
Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Eco-  
logy and Economics*. 2017;2(26):105–116. (In Russ.).  
doi: 10.25283/2223-4594-2017-2-105-116

Pavlov D. S., Makhrov A. A. Aquaculture and its  
impact on wild salmon populations. *Assotsiatsiya sto-  
ronnikov sokhraneniya lososevykh vidov ryb = Asso-  
ciation of Salmon Conservation Supporters*. 2020.  
(In Russ.). URL: <https://ru.russiansalmon.org/info/aquaculture/> (accessed: 16.09.2025).

Plotnikov G. K., Peskova T. Yu., Shkute A., Pupin A., Pupinš M. Fundamentals of ichthyology. A collection of classic methods of ichthyological research for use in aquaculture. Daugavpils: Saule; 2018. 253 p. (In Russ.)

Sadchikov A. P., Kudryashov M. A. Ecology of coastal-aquatic vegetation. Moscow: NIA-Priroda, REFIA; 2004. 220 p. (In Russ.)

Skupinova E. A. (ed.). Atlas of the Vologda Region: a study guide. Cherepovets: Port-Aprel; 2007. 108 p. (In Russ.)

Stepanov M. V., Bolotova N. L. Fisheries and fish industry. *Zhivotnyi mir Vologodskoi oblasti = Animal world of the Vologda Region*. Vologda: VoGU; 2021. P. 298–323. (In Russ.)

*Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag; 1991. B. 2, no. 3. 576 p.; 1991. B. 2, no. 4. 437 p.

Tsalolikhin S. Ya. (ed.). A key to zooplankton and zoobenthos of the freshwater bodies in the European part of Russia. Vol. 2. Zoobenthos. Moscow: KMK; 2010. 457 p. (In Russ.)

Vorob'ev G. A. (ed.). Nature of the Vologda Region. Vologda: Vologzhanin; 2007. 434 p. (In Russ.)

Vorob'ev G. A. Landscape determination of limnogenesis and anthropogenic eutrophication of small lakes. *Antropogennye izmeneniya ekosistem malyykh ozer (prichiny, posledstviya, vozmozhnost' upravleniya) = Anthropogenic changes in small lake ecosystems (causes, consequences, and management possibilities)*. Part 1. St. Petersburg; 1991. P. 79–82. (In Russ.)

Zhakov L. A. Formation and structure of fish populations in lakes of the Northwest USSR. Moscow: Nauka; 1984. 144 p.

Поступила в редакцию / received: 29.09.2025; принята к публикации / accepted: 30.09.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Болотова Наталья Львовна

д-р биол. наук, профессор кафедры биологии и химии  
e-mail: bolotova.vologda@mail.ru

### Мухин Иван Андреевич

канд. биол. наук, заведующий кафедрой геоэкологии, природопользования и экологической безопасности  
e-mail: periphyton35@gmail.com

### Лопичева Ольга Георгиевна

аспирант кафедры биологии и химии  
e-mail: olga2008.08@bk.ru

### Арашин Сергей Юрьевич

аспирант кафедры биологии и химии ВоГУ, старший лаборант лаборатории экологии водных беспозвоночных ИБВВ РАН  
e-mail: ar.serg@rambler.ru

## CONTRIBUTORS:

### Bolotova, Natalia

Dr. Sci. (Biol.), Professor

### Mukhin, Ivan

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

### Lopicheva, Olga

Doctoral Student

### Arashin, Sergey

Doctoral Student, Senior Laboratory Assistant

## ЗИМНЯЯ ЛИМНОЛОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА-ПРАКТИКА – 2025

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) совместно с ФГБУ «Объединенная дирекция государственного природного заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» и Государственным автономным учреждением дополнительного профессионального образования Республики Карелия «Карельский институт развития образования» (КИРО) организовали и провели 6–11 апреля 2025 г. научно-образовательное мероприятие «Зимняя лимнологическая школа-практика».

Мероприятие было включено в план работы Карельского отделения Русского географического общества на 2025 год.

Зимняя лимнологическая школа-практика – это традиционное мероприятие ИВПС КарНЦ РАН, которое стартовало в 2006 году при тесном сотрудничестве с Университетом Хельсинки и проходило на базе биологической станции «Ламми» (Финляндия).

В ИВПС работы велись по Программе Президиума РАН «Поддержка молодых ученых», раздел «Поддержка деятельности институтов РАН по привлечению талантливой молодежи к научной работе».

В связи с изменением ситуации в 2021 году принимающей стороной зимней лимнологической школы-практики выступил Институт проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) Кольского научного центра РАН. 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».

Наш мир постоянно претерпевает изменения. Одни нормы и принципы сменяются другими. Однако созданные традиции надо соблюдать, в этом залог развития общества в целом. Зимняя лимнологическая школа-практика – это научный

код ИВПС, и поэтому в 2025 году было принято решение организовать мероприятие на территории Карелии с проверенными партнерами, а молодые научные сотрудники института активно включились в работу, доказывая своим энтузиазмом, что формирование у молодого ученого представлений о науке начинается с его учителя.

Смелые и отважные участники Зимней лимнологической школы-практики – 14 учителей из различных районов Республики Карелия, 10 студентов ПетрГУ (Петрозаводск) и РГГМУ (Санкт-Петербург) и один аспирант – прибыли на территорию г. Костомукши 6 апреля. Мероприятие началось 7 апреля с приветствия участникам от лица организаторов школы заместителя директора ИВПС КарНЦ РАН по научно-организационной работе Т. И. Регеранд и директора государственного природного заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» С. В. Тархова.

Программа школы-практики была тщательно продумана и подготовлена с учетом состава участников, имеющих неодинаковую теоретическую и практическую подготовку, а также опыт научных исследований на момент проведения мероприятия.

Основная цель научно-образовательного мероприятия – создание/повышение навыков проведения полевых исследований по разным дисциплинам изучения водных объектов. Поставлены и выполнены задачи освоения различных методик отбора гидрохимических и гидробиологических проб при проведении гидрологических и гидрофизических измерений, разбор проб в лабораторных условиях, анализ данных и представление полученных результатов.

Новую территорию проведения научных исследований – заповедник «Костомукшский» – охарактеризовали в дистанционных теоретических лекциях ведущие специалисты в области геологии и гидрохимии: «Геологические





и геоморфологические особенности территории заповедника «Костомукшский» (к.г.-м.н. Т. С. Шелехова), «Гидрохимические особенности водных объектов Северной Карелии» (к.х.н. Н. Е. Галахина), «Дендроиндикационные исследования колебания уровня воды в озерах» (к.г.н. С. П. Гриппа). Особое внимание уделено сезону проведения мероприятия в онлайн-лекции «Исследования водных объектов в зимний период» (к.г.н. А. В. Толстиков).

Сотрудники заповедника под руководством заместителя директора по научной работе Е. В. Кузнецовой организовали не только быт и процесс обучения с предоставлением необходимого оборудования и помещений, но и широкую программу, включающую в первую очередь инструктаж по технике безопасности, а далее – знакомство с научной деятельностью заповедника, с визит-центром, с историей создания заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» и перспективой развития. Сразу же были проведены практические занятия по темам «Охрана окружающей среды в свете краеведения», «Пример экологической тропы» и мастер-класс по туризму «Как выжить ученому в зимнем лесу».

Во второй день работы Зимней лимнологической школы состоялась полевая практика на льду оз. Контокки, включающая в себя отбор проб воды, донных отложений, измерения мутности воды, минерализации и других показателей, отлов рыбы и гидрофизические измерения. Для получения доступа к исследуемым объектам участники школы-практики преодолели снежный пешеходный маршрут от базы до озера – 450 метров пути с использованием снегоступов.

Во второй половине дня участники школы-практики прослушали лекции сотрудников ИВПС КарНЦ как пример возможных исследований на территории заповедника: «Методы полевых исследований (на примере работ, проводимых в районе о. Кижы Онежского озера)» (С. М. Сидоров), «Гидрохимические исследования – комплекс параметров, методика отбора проб» (И. В. Морозова), «Фитопланктон района Кижские шхеры Онежского озера» (С. И. Тихомирова), «Зоопланктон района Кижские шхеры Онежского озера» (к.б.н. Ю. Ю. Фомина), «Макрозообентос Кижских шхер Онежского озера», «Макрозообентос как индикатор состояния водных объектов» (к.б.н. А. И. Сидорова).

Во второй половине дня участники школы-практики под руководством научных сотрудников А. И. Сидоровой (ИВПС КарНЦ РАН) и Ю. Ю. Фоминой (КарелВНИРО) работали с микроскопами, разбирая, обрабатывая и анализируя гидробиологические пробы.

В проведении лабораторных исследований принимали участие сотрудники ИВПС КарНЦ РАН И. В. Морозова (анализ проб донных отложений) и С. И. Тихомирова (разбор проб фитопланктона). Занятия в Зимней лимнологической школе-практике включают в себя активную подготовку материалов для докладов и презентаций, важной частью которых являются гидрофизические показатели, определяемые во время полевых исследований под руководством сотрудника ИВПС КарНЦ РАН С. М. Сидорова.

Четвертый день работы школы-практики посвятили озеру Каменному. Маршрут экспресс-экспедиции был сложным, совмещающим поездку на машинах и поход по тропе корабейников. Е. В. Кузнецова провела для участников уникальную экскурсию с показом как природных, так и исторических экспонатов. Согласно программе мероприятия на оз. Каменном были отобраны пробы, которые в тот же день по возвращении на базу разобрали и проанализировали участники мероприятия. Научный энтузиазм как учителей, так и студентов, принимающих участие в работе школы-практики, предполагает получение достойных результатов.

О работе Зимней лимнологической школы-практики – 2025 А. И. Сидорова и Ю. Ю. Фомина рассказали в прямом эфире Костомукшского радио.

11 апреля Зимняя лимнологическая школа-практика – 2025 завершилась. Программа была насыщена событиями разного формата: наука, образование, походы и даже рыбалка с исследовательскими целями объединили участников.

Утром заключительного дня участники школы-практики закончили работу над докладами, которые позже успешно представили в виде презентаций на конференции заповедника «Костомукшский», где им вручили сертификаты, а преподаватели средних школ получили также удостоверения о повышении квалификации от КИРО.

Участники мероприятия в анкетах-отзывах отметили, что «программа была очень насыщенной, с полным погружением в настоящую научную работу». В качестве полезных моментов указаны «идеи для проектной деятельности», «знакомство с методикой изучения объектов природы и возможность использовать полученные знания в своей работе». Также отмечены «гостеприимство заповедника» и «высокий уровень подготовки кураторов-организаторов программы» с пожеланием проведения следующей Зимней лимнологической школы-практики.

*Т. И. Регеранд, А. И. Сидорова,  
Е. В. Кузнецова*

### **III МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ОЗЕРА ЕВРАЗИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ» (Казань, 20–23 мая 2025 г.)**

В мае этого года в столице Республики Татарстан проводилась III Международная конференция «Озера Евразии: проблемы и пути их решения», организованная Институтом проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан и Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук.

Казань уже во второй раз принимала у себя специалистов-озероведов со всей России, стран ближнего и дальнего зарубежья: предыдущая конференция, на которой обсуждались текущие задачи и перспективы дальнейшего развития лимнологической науки и практики, состоялась в столице республики в мае 2019 г.

Традиционными задачами конференции являются консолидация ученых стран Евразии, БРИКС для получения новых научных знаний, объединение усилий для решения практических проблем трансграничных озерно-речных систем, обоснование возможного перераспределения водных ресурсов, рационального использования и охраны озер Евразии. Очевидно, что развитие проекта евразийской интеграции

не может осуществляться без должного внимания к вопросам окружающей среды, и особенно к ее водным объектам. Для гармоничного процесса международного развития Евразии актуальным является изучение фундаментальных проблем и решение практических вопросов в тесном сотрудничестве ученых многих стран.

В работе конференции приняли участие более 200 специалистов – пять членов Российской академии наук, три члена Академии наук Республики Татарстан, 40 докторов и 78 кандидатов наук, 20 молодых ученых, аспирантов и студентов, представлявших свыше 65 отечественных и зарубежных учреждений высшего образования, научных институтов и других организаций из 18 городов России и иностранных государств.

Издан сборник трудов, в который вошли 320 статей. Материалы конференции представлены на сайте: <https://www.antat.ru/ru/ipen/>.

Участников конференции приветствовали представители Академии наук Республики Татарстан, Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан, Государственного





Участники секции 2 «Экосистемы озёр. Гидробиологические исследования»

комитета Республики Татарстан по биологическим ресурсам, Российской академии наук.

Работа проводилась в рамках двух пленарных заседаний и шести секций: «Гидрологические и гидрофизические процессы в озерах», «Экосистемы озёр. Гидробиологические исследования», «Гидрохимические исследования озёр. Оценка качества воды и донных отложений», «Общие вопросы функционирования экосистем озёр Евразии», «Ихтиофауна и рыбохозяйственное использование озёр», «Экосистемы болот».

На конференции «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» в тесном сотрудничестве ученых обсуждались следующие основные проблемы:

- современное состояние и изменения экосистем озёр Евразии;
- проблемы и пути решения совместного использования трансграничных озерно-речных систем;
- анализ внутривековых изменений гидрологического режима озёр;
- перспективные методы моделирования для управления озерными экосистемами;
- вселенцы и их роль в изменении экосистем озёр;
- формирование химического состава воды и донных отложений озёр и нормирование их качества;
- актуальные проблемы палеолимнологии;
- болота и их роль в формировании биологического разнообразия экосистем;
- рекреационное использование озёр и развитие экологического туризма.

Евразия – самый большой материк на Земле, население которого составляет 3/4 населения всей планеты. Это наиболее быстро развивающийся и технологически развитый регион, который требует для экономики и жизни населения больших ресурсов, и в первую очередь водных, которыми богата его территория. Здесь расположены уникальные водные объекты, такие как Каспий, Байкал, крупнейшие озера Европы Ладожское и Онежское, Арал, Иссык-Куль, Телецкое, Севан, Баскунчак, Хубсугул, Урмия, озера Арктической зоны, трансграничные озера Ханка, Псковско-Чудское, Или-Балхашской системы и еще несколько миллионов разнообразных водных объектов.

Озера и водохранилища, озерно-речные системы используются для питьевого водоснабжения, водоотведения, водного транспорта, энергетики, рекреации, получения биоресурсов, развития аквахозяйств. При этом имеются многочисленные проблемы сохранения экосистем, рационального использования ресурсов для настоящего и будущих поколений. Важной целью конференции стало создание научной платформы для обсуждения актуальных проблем многочисленных континентальных водных объектов с учетом их природного разнообразия, трансграничного положения, различия подходов к использованию их ресурсов в условиях глобального изменения климата.

Озера и их водосборы и озерно-речные системы являются одним из факторов формирования сложных социо-эколого-экономических структур. По этой причине при разрозненно-



Работа секции 3 «Гидрохимические исследования озер. Оценка качества воды и донных отложений»

сти усилий научных организаций разных стран, недостаточной координации работ и несовершенстве национальных региональных подходов и методов проведения мониторинговых исследований, а также при отсутствии эффективных механизмов управления, основанных на полученных данных, знаниях и применении соответствующих математических моделей, решить проблемы, связанные с использованием и охраной водных объектов, достаточно трудно. Участники конференции в своих выступлениях неоднократно отмечали, что оптимальные решения рассматриваемых научных проблем, связанных с изучением, использованием и охраной водных объектов, должны учитывать

экономику, социальную сферу и политическую ситуацию. Подчеркивалась важность гармонизации подходов к охране и рациональному использованию ресурсов, оценке параметров качества вод. Нормативные документы, регламентирующие критерии оценки экологического состояния трансграничных водных объектов, требуют согласования на уровне межправительственных соглашений.

В пленарных и секционных выступлениях участников в очередной раз подчеркивалась особая значимость получения достоверных и сопоставимых результатов количественного анализа определяемых компонентов (концентраций) химических параметров, полученных



Доклад о Телецком озере на секции 1 «Гидрологические и гидрофизические процессы в озерах»



На секции 4 рассматривались общие вопросы функционирования экосистем озер Евразии



Экскурсия на Голубые озера

различными аналитическими методами, в частности, необходимость консолидации усилий по гармонизации подходов по оценке разнообразных параметров вод, в особенности биогенных и загрязняющих веществ, на всех уровнях взаимодействия ученых и специалистов, работающих в этой сфере.

Также участники форума отмечали важность и неотложность совершенствования подходов в экологическом и географическом образовании в соответствии с предстоящими задачами. Неоднократно звучали предложения о необходимости регулярного проведения школ, семинаров и конференций по актуальным проблемам гидрологии, на которых будут обсуждаться вопросы и предлагаться решения наиболее важных теоретических и практических задач лимнологии Евразии.

В ближайшей перспективе необходимо обратить особое внимание лимнологов Евразии на следующие направления научных исследований:

- озера и водохранилища как резервуары/источники пресной воды, питьевого водоснабжения;
- трансграничные проблемы лимнологии;
- водные объекты в национальном богатстве стран Евразии;
- озера для мониторинга климата;
- озера, водохранилища, озерно-речные системы как важный компонент глобального углеродного цикла, включая круговорот углекислого газа и источники метана;

- озера как «продукт» и регуляторы регионального климата;

- озера и озерно-речные системы как объекты хозяйственной и рекреационной деятельности (биоресурсы, гидроэнергетика, водный транспорт, питьевое водоснабжение, аквакультура, рекреация);

- совершенствование прогноза гидрологического режима и экосистем озер для долгосрочного планирования экономической деятельности и сохранения озер;

- создание интегрированных систем управления водопользованием, обеспечивающих информационную поддержку природоохранных органов;

- разработка и внедрение инновационных методов моделирования сложных систем в озерах, оценки состояния и изменений их трофического статуса, качества вод, водных и биологических ресурсов малоизученных или вовсе не изученных озер.

Для консолидации усилий и развития лимнологии представляется целесообразным рассмотреть вопрос издания международного печатного и электронного журнала «Озера Евразии», а также создания Ассоциации лимнологов Евразии. Участники отметили важность регулярного проведения конференций с периодичностью раз в 2–3 года в разных странах БРИКС, а также создания координационного совета «Озера Евразии».

*Р. Р. Шагидуллин, Д. В. Иванов,  
Н. Н. Филатов, Т. И. Регеранд*

## 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 высылается 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 высылается 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](mailto:trudy@krc.karelia.ru), или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

Для публикации в выпусках серии «Математическое моделирование и информационные технологии» рукописи принимаются в формате .tex (LaTeX 2ε) с использованием стилевого файла, который находится по адресу <http://transactions.krc.karelia.ru/section.php?id=755>.

### **Обязательные элементы рукописи располагаются в следующем порядке:**

УДК курсивом в левом верхнем углу первой страницы; заглавие статьи на русском языке полужирным шрифтом; инициалы и фамилии авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название и полный почтовый адрес организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов аффилированным организациям; следует отметить звездочкой автора, ответственного за переписку, и указать в аффилиации его электронный адрес); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; указание источников финансирования выполненных исследований на русском языке.

Далее располагаются все вышеуказанные элементы на английском языке.

Текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности; списки литературы на языке оригинала (**Литература**) и на английском языке (**References**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; можно указать телефон для контакта редакции с авторами статьи.

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать ее содержание и состоять из 8–10 значащих слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (как правило, не менее пяти). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце точка не ставится.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. На табличный и иллюстративный материал следует ссылаться так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т.д.), фотографии, помещаемые на 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. Проводить 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<sup>1\*</sup>, О. В. Балан<sup>1</sup>, В. А. Корнева<sup>2</sup>, И. Е. Малышева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), \*topchieva@ya.ru

<sup>2</sup>Петрозаводский 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<sup>1\*</sup>, O. V. Balan<sup>1</sup>, V. A. Korneva<sup>2</sup>, I. E. Malysheva<sup>1</sup>. 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**

<sup>1</sup>Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*topchieva@ya.ru

<sup>2</sup>Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

Аннотация на английском языке

Keywords: arterial hypertension; nitric oxide; inducible nitric oxide synthase; angiotensin-converting enzyme; insertion-deletion polymorphism of *ACE* genes; aldosterone synthase; *CYP11B2* gene

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (0218-2019-0077).

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °C) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

| Показатель<br>Index                                                                               | Контроль<br>Control | Охлаждение<br>проростков<br>Seedling chilling | Охлаждение<br>корней<br>Root chilling |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|
| Площадь среза хлоропласта, мкм <sup>2</sup><br>Chloroplast cross-sectional area, μm <sup>2</sup>  | 10,0 ± 0,7          | 13,5 ± 1,1                                    | 12,7 ± 0,5                            |
| Площадь среза митохондрии, мкм <sup>2</sup><br>Mitochondria cross-sectional area, μm <sup>2</sup> | 0,4 ± 0,03          | 0,5 ± 0,03                                    | 0,6 ± 0,04                            |
| Площадь среза пероксисомы, мкм <sup>2</sup><br>Peroxisome cross-sectional area, μm <sup>2</sup>   | 0,5 ± 0,1           | 0,5 ± 0,1                                     | 0,7 ± 0,1                             |
| Число хлоропластов на срезе клетки, шт.<br>Number of chloroplasts in cell cross-section           | 9 ± 1               | 8 ± 1                                         | 10 ± 1                                |
| Число митохондрий на срезе клетки, шт.<br>Number of mitochondria in cell cross-section            | 8 ± 1               | 8 ± 1                                         | 10 ± 1                                |
| Число пероксисом на срезе клетки, шт.<br>Number of peroxisomes in cell cross-section              | 2 ± 0,3             | 2 ± 0,3                                       | 3 ± 0,4                               |

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Dulldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

### Ссылки на книги

#### Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

#### References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

### Ссылки на статьи

#### Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // Entomologica Fennica. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

#### References:

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews*. 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

#### Литература:

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

#### References:

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf.* (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000). Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

#### Литература:

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

#### References:

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

#### Литература:

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

#### References:

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

#### Литература:

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

#### References:

Grebenshchikov Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

#### Ссылки на интернет-ресурсы

##### **Литература:**

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

##### **References:**

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

**Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences**  
**No. 6, 2025**  
**LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series**

**TABLE OF CONTENTS**

**HYDROPHYSICS. HYDROLOGY**

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A. N. Egorov, D. D. Yaskelyaynen, E. S. Zadereev. CURRENT CHALLENGES IN THE STUDY OF SALT LAKES .....                                                                                                                                                                       | 5  |
| A. F. Balaganskiy, A. V. Tolstikov. VARIABILITY OF FALL RUNOFF TO KARELIAN RIVERS IN 1993–2022 .....                                                                                                                                                                        | 17 |
| G. E. Zdorovenнова, R. E. Zdorovennov, Yu. S. Novikova, T. V. Efremova. THERMAL AND ICE REGIMES IN PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGO IN 2023–2024 BASED ON DATA OF MEASUREMENTS AT AN AUTONOMOUS STATION .....                                                                 | 27 |
| R. E. Zdorovennov, G. E. Zdorovennova, A. V. Tolstikov, Yu. S. Novikova, S. R. Bogdanov, Yu. N. Lukina. HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE MARINE ENVIRONMENT IN BLAGOPOLUCHIYA BAY (SOLOVETSKY ISLANDS, WHITE SEA): AN ASSESSMENT BASED ON FIELDWORK IN APRIL 2025 ..... | 39 |

**HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS**

|                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| E. A. Minakova, A. P. Shlychkov, S. A. Kondratyev, V. Z. Latypova, D. A. Minakova. QUANTIFICATION OF DIFFUSE NUTRIENT LOAD FROM AGRICULTURE ON THE CATCHMENTS OF THE KUIBYSHEV AND NIZHNEKAMSK STORAGE RESERVOIRS WITHIN THE REPUBLIC OF TATARSTAN ..... | 57 |
| I. I. Ziganshin, D. V. Ivanov, R. R. Khasanov, V. S. Valiev, A. B. Alexandrova. SEDIMENTATION AND ORGANIC CARBON ACCUMULATION IN SEDIMENTS OF LAKES FORMED IN DETACHED BAYS OF THE KUIBYSHEV STORAGE RESERVOIR .....                                     | 70 |

**HYDROBIOLOGY**

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| M. T. Syarki, D. S. Konovalov. SEASONAL DYNAMICS OF ZOOPLANKTON VERTICAL DISTRIBUTION IN KONDOPOGA BAY, LAKE ONEGO .....                             | 82  |
| G. T. Frumin, A. S. Shurukhin. USING DIVERSITY INDICES TO ASSESS THE DYNAMICS OF COMMERCIAL FISH POPULATIONS IN LAKE LADOGA .....                    | 97  |
| E. M. Makarova. ASSESSING THE ECOLOGICAL STATE OF A LAKE ONEGO TRIBUTARY FLOWING THROUGH URBANIZED TERRITORY USING BACTERIOPLANKTON INDICATORS ..... | 106 |

**RESEARCH METHODS**

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| N. A. Paniutin, V. V. Dmitriev, E. A. Primak. INTEGRAL ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATUS TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEAR RELATIONSHIP BETWEEN PARAMETERS AND EMERGENT PROPERTIES OF THE WATER BODY ..... | 119 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| N. N. Filatov, Yu. N. Lukina, N. E. Galakhina, N. M. Kalinkina, E. V. Tekanova, Ya. P. Molchanova. ON THE QUESTION OF ASSESSING THE CURRENT STATE AND PREDICTING CHANGES IN THE LAKE-CATCHMENT SYSTEM AS A NATURAL ASSET . . . . . | 131 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

#### RECREATIONAL POTENTIAL EVALUATION

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| N. L. Bolotova, I. A. Mukhin, O. G. Lopicheva, S. Yu. Arashin. FACTORS LIMITING THE AQUACULTURAL USE OF SMALL LAKES IN MID-BOREAL LANDSCAPES (CASE STUDY OF LAKE LESNOYE, VOLOGDA REGION) . . . . . | 151 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

#### CHRONICLE

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| T. I. Regerand, A. I. Sidorova, E. V. Kuznetsova. Winter Limnological School and Workshop 2025 . . .                                                                       | 166 |
| R. R. Shagidullin, D. V. Ivanov, N. N. Filatov, T. I. Regerand. 3rd International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solutions” (Kazan, May 20-23, 2025) . . . . . | 170 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| INSTRUCTIONS FOR AUTHORS . . . . . | 174 |
|------------------------------------|-----|

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра  
Российской академии наук**  
№ 6, 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 27.10.2025. Дата выхода 31.10.2025. Формат 60x84<sup>1/8</sup>.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 21,7. Усл. печ. л. 21,1.  
Тираж 100 экз. Заказ 869. 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