

Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр Российской академии наук»



# **ТРУДЫ**

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

№ 2, 2024

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск  
2024

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. ХЕЛЬТТЯ, 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](mailto:trudy@krc.karelia.ru)

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

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences



# **TRANSACTIONS**

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

No. 2, 2024

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY

Petrozavodsk  
2024

Editor-in-Chief

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

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); I. V. DROBYSHEV, PhD (Biol.) (Sweden – Canada); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; T. E. HANG, PhD (Geog.) (Estonia); P. HÖLTTÄ, PhD (Geol.), Prof. (Finland); E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; H. JOOSTEN, Dr. (Biol.), Prof. (Germany); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); N. V. LUKINA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; O. OVASKAINEN, PhD (Math.), Prof. (Finland); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SUBBOTIN, PhD (Biol.) (USA); D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); K. SZAJEWSKI, PhD (Math.), Prof. (Poland); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the Limnology and oceanology Series

N. L. BOLOTOVA, DSc (Biol.), Prof.; A. P. FEDOTOV, DSc (Geol.-Miner.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.), Prof.; N. E. GALAKHINA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Chem.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); N. V. IL'MAST, DSc (Biol.); A. V. ISAEV, PhD (Geog.); D. V. IVANOV, DSc (Geog.); S. F. KOMULAINEN, DSc. (Biol.); S. A. KONDRAT'EV, DSc (Phys.-Math.); A. V. KURAEV, PhD (Geog.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.), Prof.; I. Sh. NORMATOV, DSc (Chem.), Prof.; L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.), PhD (Biol.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. I. SIDOROVA, PhD (Biol.); A. V. ZIMIN, DSc (Geog.).

*Published since January 2009*

*8 issues a year*

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

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

E-mail: [trudy@krc.karelia.ru](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, 2024

© Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences, 2024

## **От редактора**

В 2024 году исполняется 300 лет Российской академии наук. В становлении и развитии отечественного озераедения она сыграла важнейшую роль. Уже в XVIII в. Императорской Академией наук организованы первые «физические» экспедиции по обследованию озер России. В 1916 г. при Императорской Санкт-Петербургской Академии наук создана Комиссия по изучению озера Байкал. В 1928 г. Президиум Академии наук преобразует Байкальскую экспедицию в Байкальскую лимнологическую станцию. А в 1944 г. по инициативе выдающегося озераеда Г. Ю. Верещагина в Ленинграде создана Лаборатория озераедения Академии наук, которая в 1971 г. была преобразована в Институт озераедения АН СССР. Таким образом, ИНОЗ РАН отмечает в этом году свой 80-летний юбилей. Вдохновленные этими важными событиями, мы решили выпустить в 2024 г. два номера серии «Лимнология и океанология», чтобы подробнее осветить современные проблемы российского озераедения, над которыми активно работают наши ученые.

Представляем вашему вниманию первый из них, подготовленный по результатам всероссийской научной конференции «Лимнология в России», проведенной в г. Санкт-Петербурге 12–14 февраля в рамках мероприятий, посвященных 80-летию Института озераедения РАН. Организаторы конференции – Институт озераедения РАН, Отделение наук о Земле РАН и Русское географическое общество.

Конференция была направлена на укрепление сотрудничества в области изучения водных объектов на территории России и расширение контактов со странами СНГ. В мероприятии приняли участие около 200 ученых из России и Республики Беларусь. Мы отмечаем высокий уровень организации конференции, а также плодотворное сотрудничество ИНОЗ РАН и ИВПС КарНЦ РАН, которое способствовало успешному ее проведению. Публикация работ участников конференции продолжится в следующем выпуске нашей серии осенью этого года.

В связи с высокой актуальностью вопросов изучения, использования и охраны экосистем континентальных водоемов Евразии, что отмечалось и в Решении конференции «Лимнология в России», мы продолжаем работу в данном направлении и планируем подготовку Третьей международной конференции «Озера Евразии – проблемы и пути решения» в 2025 году совместно с Институтом проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан.

Благодарим всех авторов статей данного выпуска и участников конференции.

*Н. Н. Филатов,  
чл.-корр. РАН, д. г. н.,  
ответственный редактор серии  
«Лимнология и океанология»*

УДК 556 (470.22)

## КОМПЛЕКСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДНОЙ СЕТИ КАРЕЛИИ

**А. В. Литвиненко**

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

В статье рассмотрены основные особенности гидрографической сети Республики Карелия и кратко оценены основные природные факторы, их определяющие (геологическое строение, рельеф, климат, географическое положение республики). Дана характеристика водоемов (озера, водохранилища) и водотоков (реки, ручьи) и их специфики. Показано их распределение по размерам и приведены количественные параметры основных из них. Рассмотрена главная региональная особенность гидрографической сети Карелии – озерно-речные системы (на примере крупнейшей из них – Ковды). Приводятся данные по запасам воды, водным ресурсам, основным особенностям их гидрохимического состава. Показано, что водообеспеченность республики по суммарным ресурсам речного стока превышает среднероссийские показатели в 1,3 раза на 1 км<sup>2</sup> территории и в 3 раза на одного жителя. Это свидетельствует о том, что обеспеченность Карелии поверхностными водными ресурсами достаточно высока и количественные параметры не являются фактором, лимитирующим развитие экономики республики (даже учитывая внутригодовую неравномерность речного стока). Существующие проблемы с водоснабжением населения и отдельных хозяйственных объектов имеют либо организационно-технический характер, либо связаны с несоответствием качества воды природных источников предъявляемым требованиям. Показаны антропогенные преобразования гидрографической сети на примере Беломорско-Балтийского канала и Выгозерско-Ондского водохранилища. Оценено влияние особенностей гидрографии и обеспеченности водными ресурсами на характер развития экономики и главные водно-экологические проблемы. Основными из этих особенностей можно считать малую водность, большие удельные падения и большую пороженность рек, большой озерный фонд, значительные запасы поверхностных водных ресурсов при относительно низких подземных, очень специфический «карельский» тип качества вод.

Ключевые слова: гидрографическая сеть; реки; озера; водохранилища; запасы вод; водные ресурсы; качество вод; гидротехнические преобразования; влияние на экономику

Для цитирования. Литвиненко А. В. Комплексная характеристика водной сети Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 6–24. doi: 10.17076/lim1829

Финансирование. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

**A. V. Litvinenko. A COMPREHENSIVE ACCOUNT OF THE KARELIAN WATER NETWORK**

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

The article examines the main features of the hydrographic network of the Republic of Karelia and briefly assesses the main natural factors that determine them (geological structure, topography, climate, geographical location of the republic). The characteristics of waterbodies (lakes, storage reservoirs) and watercourses (rivers, streams) and their specific features are recounted. Their size distribution and the quantitative parameters of the main objects are given. The main regional feature of the hydrographic network of Karelia – lake-river systems is considered (through the example of the largest – Kovda system). Data on water reserves, water resources, and the main features of their hydrochemical composition are presented. It is shown that the total river flow resources in the republic are 1.3-fold higher than the national average per 1 km<sup>2</sup> and 3-fold higher per inhabitant. Thus, the supply of surface water resources in Karelia is quite high and their quantities are not a factor limiting the development of the republic's economy (even taking into account the intra-annual fluctuations of river flow). The problems existing with water supply to the population and some economic facilities are either of organizational and technical nature, or are associated with below-standard water quality of natural sources. Transformations of the hydrographic network under human impact are shown using the example of the White Sea-Baltic Canal and the Vygozero-Onda reservoir. The impact of hydrographic features and water resource availability on economic development and the main water and environmental problems is evaluated. The most significant among these features are low water content, high gradient and large rapids of rivers, a large proportion of lakes, significant reserves of surface water resources versus relatively low groundwater resources, a very specific "Karelian" type of water quality.

**Keywords:** hydrographic network; rivers; lakes; storage reservoirs; water reserves; water resources; water quality; hydrotechnical transformations; impact on the economy

**For citation:** 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. No. 2. P. 6–24. doi: 10.17076/lm1829

**Funding.** The article was prepared using federal budget funding under state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

## **Введение**

Карельский гидрографический район – уникальное явление не только в России, но и в мире. Сравниться с ним по своеобразию, сложности строения, степени развития речной сети, величине озерности, специфике гидрохимического состава и другим характеристикам могут в какой-то степени только сопредельная Финляндия и некоторые районы Канады. Это обусловлено всем комплексом природных условий региона и, в свою очередь, оказывает существенное влияние на специфику экономики республики и экологическую ситуацию в целом. Рассмотрению этих вопросов и посвящена данная статья.

Представленный материал может быть использован при подготовке лекций для студентов географических, экологических и биологических специальностей вузов и при изучении

географии, природоведения, краеведения или факультативных занятий в общеобразовательных школах Карелии.

## **Природные факторы формирования гидрографической сети**

Специфика гидрографии любого региона обусловлена особенностями всего комплекса природных условий. Но всегда можно выделить некоторые из них, внесшие основной вклад в формирование водной сети. Для Карелии это в первую очередь геологическое строение территории, ее рельеф и климат, а также географическое положение республики.

В геологическом отношении Карелия является восточной окраиной Балтийского (Фенноскандинавского) кристаллического щита – области распространения преимущественно древнейших кристаллических пород архейско-

протерозойского комплекса с возрастом до 3,5 млрд лет. Они перекрыты тонким слоем четвертичных отложений, представленных сложным комплексом ледниковых (в основном), межледниковых и послеледниковых отложений. Их мощность колеблется от 0 до 110–130 м. Максимальные значения отмечаются в крайней южной части (Пудожском и Олонецком районах). Небольшая юго-восточная часть Карелии сложена осадками Русской плиты Восточно-Европейской платформы.

Главные элементы рельефа обусловлены сочетанием древних тектонических процессов с денудацией и аккумуляцией четвертичного периода, важнейшим событием которого были мощные материковые оледенения. Основное влияние на формирование современного рельефа оказало последнее из них – валдайское (поздневалдайское), закончившееся только 10–11 тыс. лет назад, что в геологическом масштабе времени представляет собой ничтожно малую величину. Двигавшийся со Скандинавии ледник произвел большую разрушительную работу, следы которой видны до сих пор. Он принес и после своего таяния отложил на земной поверхности большие объемы несортированных обломков горных пород (морены). В результате сформировался очень специфический чрезвычайно расчлененный грядово-холмистый рельеф с абсолютными отметками, не превышающими 200 м. И только на крайнем северо-западе, на горном массиве Маанселькя они достигают 500–600 м (г. Нуорунен – 577 м, Мянтьютунтури – 550, Сиеппитунтури – 537, Кивакка – 500 м). Высоты Западно-Карельской возвышенности составляют 330–417 м, Олонецкой – до 313 м, а основная часть территории лежит в пределах 100–200 м над уровнем моря.

Для южных районов республики характерна северо-западная ориентировка форм рельефа, для северных – широтная, реже северо-восточная или северо-западная, что во многом определило и ориентировку водных объектов, в первую очередь рек. Деятельность ледника и ледниковых вод придала особый облик доледниковому рельефу, не меняя его главных черт. В частности, сохранились результаты вертикальных тектонических движений, сопровождавшихся поднятиями и опусканиями земной коры. В то время образовались котловины Ладожского, Онежского и других озер, Белого моря. В трещинах и разломах заложились речные долины. Но в целом современная гидрографическая сеть начала формироваться только после ухода ледника, и этот процесс продолжается до сих пор.

Климат Карелии переходный от морского к континентальному. В течение всего года для него характерно преобладание воздушных масс атлантического и арктического происхождения. Климат характеризуется продолжительной мягкой зимой и коротким прохладным летом, значительной облачностью, высокой влажностью и неустойчивой погодой в течение всего года. Наиболее существенное значение для формирования гидрографической сети и гидрологического режима водных объектов имеют атмосферные осадки и испарение. Территория республики относится к зоне избыточного увлажнения, что определяется сравнительно небольшим приходом тепла и хорошо развитой циклонической деятельностью во все сезоны. Количество осадков составляет 550–750 мм в год, возрастая с севера на юг. В то же время вследствие невысоких летних температур, большой облачности, повышенной влажности воздуха Карелия является зоной относительно малого испарения, составляющего от 310 мм в год на севере до 420 на юге. Таким образом, испаряется только 50–60 % осадков, остальная часть идет на формирование речного стока.

Большое значение имеют также особенности географического положения республики, которые заключаются в прохождении по ее территории Беломорско-Балтийского водораздела (он же является и одним из основных водоразделов Земли – между Атлантическим и Северным Ледовитым океанами) и близости к нему крупных базисов эрозии (приемников речного стока) – Белого моря, Ладожского и Онежского озер (рис. 1). Максимальное расстояние от водораздела до водоприемников не превышает по прямой 300 км. К беломорской части относится 57 % территории республики, к балтийской – 43 % (без учета относящихся к Республике Карелия частей акваторий Белого моря, Ладожского и Онежского озер). В свою очередь, на территории бассейна Балтийского моря выделяются бассейны Ладожского и Онежского озер и маленький участок водосбора Ботнического залива (на западе республики в районе г. Костомукши). На юго-востоке Карелии в Пудожском районе на территорию республики попадает небольшой (несколько десятков квадратных километров) участок бассейна крупного бессточного водоема – Каспийского моря-озера.

Таким образом, суммируя вышесказанное, следует отметить, что главными обстоятельствами, определившими специфику гидрографической сети Карелии, являются:

– геологическая молодость сети;

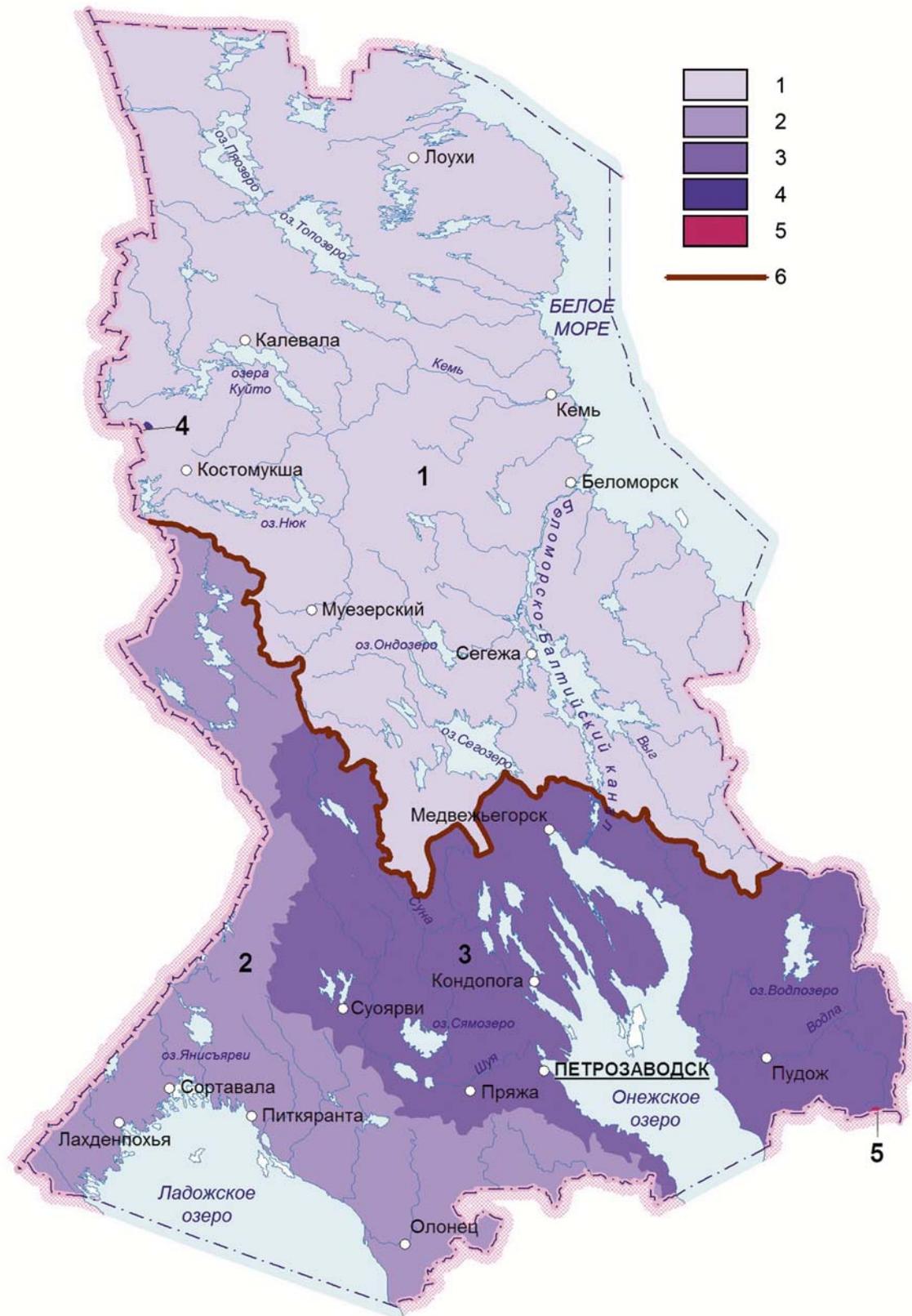


Рис. 1. Главный водораздел Карелии:

1 – бассейн Белого моря; 2–4 – бассейн Балтийского моря: 2 – собственный бассейн Ладожского озера (без бассейна Онежского озера), 3 – бассейн Онежского озера, 4 – бассейн Ботнического залива; 5 – бассейн Каспийского моря; 6 – Беломорско-Балтийский водораздел

Fig. 1. The main watershed of Karelia:

1 – White Sea basin; 2–4 – Baltic Sea basin: 2 – natural basin of Lake Ladoga (without the Lake Onega basin), 3 – basin of Lake Onega, 4 – basin of the Gulf of Bothnia; 5 – Caspian Sea basin; 6 – White Sea-Baltic watershed

- неглубокое залегание кристаллических пород и малая мощность рыхлых четвертичных отложений;
- наличие множества заполненных водой тектонических нарушений;
- чрезвычайно расчлененный рельеф ледникового происхождения;
- сравнительное обилие атмосферных осадков при низком испарении;
- близость главного водораздела к базисам эрозии [Литвиненко, 1999а].

## Водоемы

Основными структурными элементами гидрографической сети Карелии являются водоемы (озера и водохранилища), во многом определяющие специфику водных систем республики. Согласно инвентаризации 1950-х годов, на территории республики было зафиксировано 42,6 тыс. озер с общей площадью 16,2 тыс. км<sup>2</sup> [Григорьев, Грицевская, 1959]. Более поздние подсчеты, выполненные на обновленной картографической основе, позволили уточнить цифры.

По современным данным, число озер с площадью более 1 га составляет 61,1 тыс., суммарная их площадь – около 18 тыс. км<sup>2</sup> [Гашева, 1967]. Нетрудно рассчитать, что один водоем приходится примерно на десять жителей Карелии. Кроме того, в пределах республики находится около 40 % акватории Ладожского и 80 % – Онежского озер, являющихся крупнейшими пресноводными водоемами Европы. Озерность территории составляет 12 %, а с учетом карельских частей Онего и Ладоги

достигает 21 %, являясь одной из самых высоких в мире (принимая площадь Карелии равной 172,4 тыс. км<sup>2</sup> с включением онежской и ладожской акваторий и 155,9 тыс. км<sup>2</sup> – без них)<sup>1</sup>. Следовательно, каждый пятый квадратный километр территории Карелии является акваторией.

В размещении озер и в изменении озерности по речным бассейнам наблюдается четкая географическая закономерность. Если южнее р. Свири коэффициент озерности не превышает 2–2,5 %, то в пределах Карелии озерность быстро возрастает, достигая в зоне 62–66° с.ш. максимальных значений (бассейн р. Кереть – 18 %, р. Ковды – 14 %). Далее к северу озерность быстро падает до 2,5–4 % на водосборах рек Кольского полуострова. Еще быстрее коэффициент озерности убывает с запада на восток. Так, уже бассейны рек Поморского побережья Белого моря и восточных притоков Онежского озера характеризуются величинами не более 4–5 %, а в Архангельской области озерность не достигает и 2 % [Григорьев, 1961].

Основное число составляют озера с площадью менее 1 км<sup>2</sup>. Более значительные размеры имеют только 1389 водоемов (чуть более 2 % от общего числа), из них лишь 20 превышают 100 км<sup>2</sup> (табл. 1). В группе малых водоемов преобладают озера, не имеющие видимого стока («бессточные»), которые представлены в основном лесными и болотными озерцами (ламбами).

<sup>1</sup> В ряде справочных изданий указывается, что площадь Республики Карелия составляет 180,5 тыс. км<sup>2</sup>, что также справедливо, так как в этом случае учитывается и прибрежная акватория Белого моря, тоже включаемая в площадь республики.

Таблица 1. Основные характеристики озер с площадью зеркала более 100 км<sup>2</sup> в современном состоянии [Каталог..., 2001; Озера..., 2013]

Table 1. Main characteristics of lakes with a mirror area of more than 100 km<sup>2</sup> in the current state [A catalogue..., 2001; Lakes..., 2013]

Водоем Reservoir	Водосбор главной реки Catchment area of the main river	Площадь, км <sup>2</sup> Area, km <sup>2</sup>		Глубина, м Depth, m		Объем, км <sup>3</sup> Volume, km <sup>3</sup>	Длина береговой линии, км Coastline length, km
		водосбора catchment	зеркала mirror	средн. average	макс. maximum		
1	2	3	4	5	6	7	8
Ладожское Ladozhskoye	Нева Neva	258300	17700	51	230	910	1570
Онежское* Oнежskoye*	Нева Neva	53100	9720	30	120	295	1810
Выгозеро* Vygozero*	Нижний Выг Nizhnii Vyg	16800	1251	5,8	25,0	7,2	658
Топозеро* Topozero*	Ковда Kovda	2540	986	15,9	56,0	15,6	545
Пяозеро* Pyaozero*	Ковда Kovda	12000	943	17,7	49,0	16,7	256

Окончание табл. 1  
Table 1 (continued)

Водоем Reservoir	Водосбор главной реки Catchment area of the main river	Площадь, км <sup>2</sup> Area, km <sup>2</sup>		Глубина, м Depth, m		Объем, км <sup>3</sup> Volume, km <sup>3</sup>	Длина береговой линии, км Coastline length, km
		водосбора catchment	зеркала mirror	средн. average	макс. maximum		
1	2	3	4	5	6	7	8
Сегозеро* Segozero*	Нижний Выг Nizhnii Vyg	6640	815	29	103	23,4	278
Водлозеро* Vodlozero*	Водла Vodla	4960	322	2,8	16,3	0,906	232
Сямозеро Syamozero	Шуя Shuya	1550	266	6,7	24,5	1,79	159
Среднее Куйто* Srednee Kuito*	Кемь Kem	9470	257	10,4	34,0	2,67	166
Верхнее Куйто Verkhnee Kuito	Кемь Kem	7150	240	8,7	44,4	2,09	295
Кереть Keret	Кереть Keret	1100	223	4,5	26,0	1,0	346
Нюк Nyuk	Кемь Kem	3090	214	8,5	40,0	1,81	255
Тикшозеро Tikshozero	Ковда Kovda	1080	209	8,0	41,0	1,68	203
Янисъярви* Yanisyarvi*	Янисйоки Yanisjoki	3660	200	10,2	57,0	2,04	133
Сандал* Sandal*	Суна Suna	6620	185	9,7	58,0	1,8	169
Ондозеро* Ondozero*	Нижний Выг Nizhnii Vyg	2380	182	3,3	8,0	0,601	154
Лексозеро Leksozero	Лендерка Lenderka	3280	166	8,5	34,2	1,4	168
Нижн. Куйто* Nizhn. Kuito*	Кемь Kem	10200	141	8,6	33,0	1,21	124
Энгозеро Engozero	Калга и Вонга Kalga and Vonga	1220	122	4,5	18,0	0,544	226
Палье* Palye*	Суна Suna	6110	100,2	18,0	74,0	1,8	77,7

Примечание. \* Водоем зарегулирован и является водохранилищем.

Note. \* The reservoir is regulated and is a reservoir.

Основные водоемы Карелии показаны на рис. 2.

В Карелии выделяются два основных типа озерных котловин по происхождению: тектонические и ледниковые (моренные). Почти все крупные и средние водоемы имеют тектонический генезис. Их котловины развиты в трещинах и сбросах с ярко выраженными следами эрозионной деятельности ледников. Они имеют, как правило, сложные очертания берегов и пересеченный рельеф дна, большие глубины.

Озера ледникового типа расположены в понижениях между моренными грядами и холмами или в подпруженных речных долинах. Они небольших размеров, имеют менее изрезанную, часто округлую форму, плоское дно без резких перепадов глубин, которые не превышают, как правило, 5–10 м. Также встречаются узкие длинные озера, через которые протекают реки.

Кроме того, существует много мелких озер болотного происхождения [Григорьев, 1961].

Одной из форм хозяйственного использования водных ресурсов является регулирование речного стока путем создания водохранилищ. Как уже отмечалось выше, молодые в геологическом отношении реки Карелии имеют неглубокие, слабо врезанные долины. Поэтому долинные водохранилища, ложем которых служит часть речной долины, даже ценой больших затоплений имеют незначительные объемы. Основным типом водохранилищ являются котловинные (озерные), созданные почти на всех крупных озерах (табл. 2). Преобладание котловинных водохранилищ является региональной особенностью республики, так как большинство водохранилищ в бывшем СССР и во всем мире долинные. Этот факт еще раз подчеркивает специфику гидрографической сети Карелии.



Рис. 2. Гидрографическая сеть Карелии  
 Fig. 2. The hydrographic network of the Republic of Karelia

Таблица 2. Параметры основных озерных водохранилищ при нормальном подпорном уровне [Государственный..., 1986, 1987]

Table 2. Parameters of the main lake reservoirs at normal retaining level [State..., 1986, 1987]

Водохранилище Reservoir	Базовые реки; озера Base rivers; lakes	Площадь, км <sup>2</sup> Area, km <sup>2</sup>		Глубина, м Depth, m		Объем, км <sup>3</sup> Volume, km <sup>3</sup>	
		водосбора catchment	зеркала mirror	средн. average	макс. maximum	полный full scope	полезный usable
1	2	3	4	5	6	7	8
Верхне-Свирское Verkhne-Svirskoye	р. Свирь; оз. Онежское Svir River; Lake Onega	57300	9840		120	295	13
Кумское (Топо-Пяозерское) Kumskoye (Торо-Пяозерское)	р. Ковда; Топозеро, Пяозеро, Кундозеро Kovda River; Topozero, Pyaozero, Kundozero	11300	1930		56	32,3	8,73
Выгозерско- Ондское Vygozersko- Ondskoye	реки Нижний Выг, Онда; Выгозеро Nizhnii Vyg, Onda Rivers; Vygozero	20800	1270		20	9,33	1,18
Сегозерское Segozerskoye	р. Сегежа; Сегозеро Segezha River; Segozero	6640	815	29	103	23,4	4,1
Юшкозерское Yushkozerskoye	р. Кемь; оз. Среднее и Нижнее Куйто Kem River; Lake Srednee Kuito and Lake Nizhn. Kuito	9900	398	10,5	35	4,18	0,644
Водлозерское Vodlozerskoye	реки Вама, Сухая Водла; Водлозеро Vama, Sukhaya Vodla Rivers; Vodlozero	4960	322	2,8		0,906	0,55
Иовское Iovskoye	р. Ковда; Соколозеро, Ругозеро, Сушозеро Kovda River; Sokolozero, Rugozero, Sushozero	19200	294		58	2,06	0,545
Янисъярви Yanisyarvi	р. Янисйоки; оз. Янисъярви Yanisjoki River; Lake Yanisyarvi	3460	200	10	8	2,04	0,42
Сандальское Sandalskoye	Кондопожский канал; оз. Сандал Kondopoga Canal; Lake Sandal	6620	185	9,5	57	1,78	0,298
Ондозерское Ondozerskoye	р. Онда; Ондозеро Onda River; Ondozero	2320	182	3,5	74	0,6	0,37
Пальеозерское Palyeozerskoye	р. Нивка; оз. Палье Nivka River; Lake Palye	6110	109	18		2	0,158

## Водотоки

Представлены большей частью либо небольшими реками, либо короткими протоками, которые соединяют многочисленные озера, образуя озерно-речные системы, что является региональной особенностью гидрографической сети Карелии. Линейная озерность (отношение длины озерных участков к общей длине системы) таких водных объектов может достигать 50–60 % и более (Ковда, Лендерка, Каменная – Ногейс-йоки). Это создает

определенные трудности при подсчете количества рек на какой-либо территории, так как не всегда понятно, какой водоток принимать за самостоятельную реку, а какой – за составную часть озерно-речной системы. Часто этот вопрос решается чисто субъективно. Так, например, озерно-речная система Ковды (рис. 3) включает по основной оси 11 озер и водохранилищ (Топозеро, Пяозеро, Кундозеро, Соколозеро, Ковдозеро и др.) и 7 раз меняет свое название (Софьянга, Кундозерка, Кума, Ругозерка, Ковдочка, Иова).

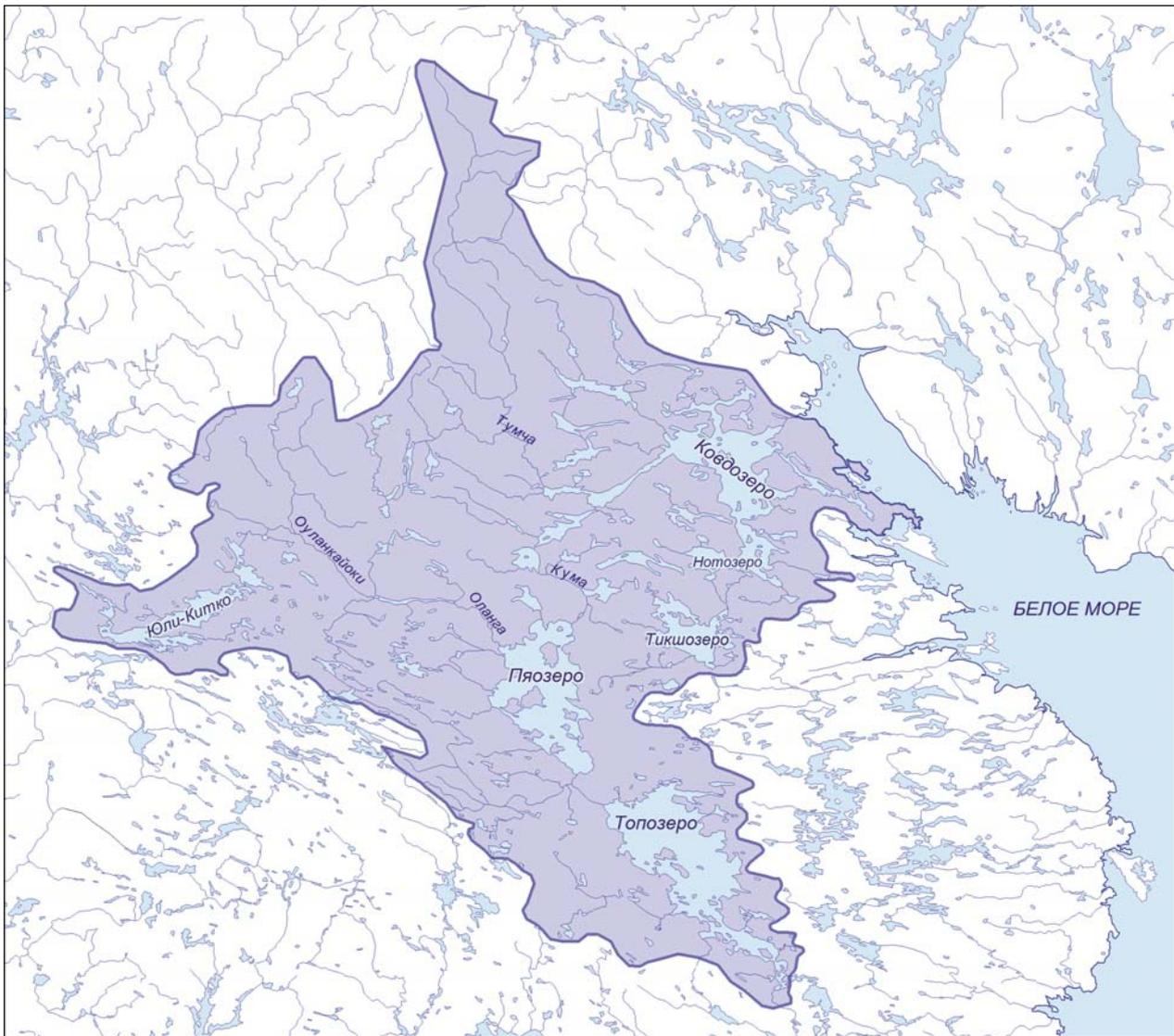


Рис. 3. Озерно-речная система Ковды  
 Fig. 3. Kovda lake-river system

Первая инвентаризация водотоков Карелии выполнена в 1950-е годы сотрудниками Отдела водных проблем (сейчас Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН) под руководством С. В. Григорьева. В пределах административных границ было выявлено 10 987 рек общей длиной 53 333 км.

По современным данным, общее число рек (включая реки Карельского перешейка) составляет 26,7 тыс. Суммарная их протяженность – 83 тыс. км. Преобладают водотоки длиной менее 10 км. Их количество 25,3 тыс. (95 %), общая протяженность – 52,3 тыс. км (63 %) [Ресурсы..., 1972]. Они уже относятся к категории ручьев. Только 30 рек имеют длину более 100 км и их можно отнести, с некоторыми оговорками, к классу средних (табл. 3). Густота

речной сети составляет 0,53 км/км<sup>2</sup>. Площадь водосбора у подавляющего числа рек также мала. Только 366 водных систем имеют бассейны площадью более 100 км<sup>2</sup>, в том числе 51 система с водосбором, превышающим 1000, и 5 – с превышающим 10 000 км<sup>2</sup> (реки Кемь, Выг, Ковда, Водла, Шуя).

Основные карельские реки и их водосборы представлены на рис. 4.

Молодостью карельских рек и особенностями кристаллического фундамента объясняется слабая врезанность их русел, неразвитость речных долин, ступенчатый характер продольного профиля, представляющего собой ряд порожистых участков, чередующихся с плесами. Часто роль плесовых участков выполняют озеровидные расширения или озера.

Таблица 3. Характеристика основных рек Карелии [Ресурсы..., 1965]

Table 3. Description of the main rivers of Karelia [Surface..., 1965]

Название реки River name	Длина, км Length, km	Площадь водосбора, км <sup>2</sup> Catchment area, km <sup>2</sup>	Площадь озер на водосборе, км <sup>2</sup> Area of lakes in the catch- ment area, km <sup>2</sup>	Принятый исток Accepted source
1	2	3	4	5
Бассейн Белого моря The White Sea basin				
Ковда Kovda	233	26 100	3 656	Топозеро Lake Topozero
Оланга Olanga	137/67	5 670/...	.../142	на территории Финляндии in Finland
Тумча Tumcha	207/172	5 240/...	215/...	на территории Финляндии in Finland
Лопская Lopskaya	106	2 760	546	Викозеро Lake Viksozero
Воньга Vonga	106	2 580	427	Энгозеро Lake Engozero
Кемь Kem	191	27 700	2 568	оз. Нижнее Куйто Lake Nizhnee Kuito
Войница Voinitsa	108/94	1 300/...	.../42,1	на территории Финляндии in Finland
Писта Pista	110	3 190	229	оз. Мульпярви Lake Mulpiyarvi
Чирка-Кемь Chirka-Kem	221	8 270	704	слияние рек Чирка и Кемь confluence of the Chirka and Kem Rivers
Кера Kera	154	1 640	94,6	оз. Таявиярви Lake Tayaviyarvi
Нижняя Охта Nizhnyaya Okhta	142	2 170	231	оз. Ватулма Lake Vatulma
Нижний Выг (Беломорско- Балтийский канал) Nizhnii Vyg (White Sea-Baltic Channel)	188	27 100	3 795	оз. Выгозеро Lake Vygozero
Выг (Верхний Выг) Vyg (Verkhonii Vyg)	135	3 000	71,1	оз. Верхотинное Lake Verkhotinnoye
Волома Voloma	138	2 070	219	оз. Волома Lake Voloma
Онда Onda	197	4 080	509	
Тунгуда Tunguda	128	1 830	178	оз. Пертярви Lake Pertyarvi
Сума Suma	164	2 020	271	оз. Мелозеро Lake Melozero
Нюхча Nyukhcha	106	1 770	50,7	оз. Нюхча Lake Nyukhcha
Бассейн Балтийского моря Собственный бассейн Ладожского озера и р. Свири The Baltic Sea basin The natural basin of Lake Ladoga and the Svir River				
Лендерка Lenderka	150/41	.../4 890	.../604	оз. Сула Lake Sula
Койтайоки Koitajoki	162/48	.../...	.../...	оз. Алинен-Айтоярви Lake Alinen-Aitoyarvi
Янисйоки Yanisjoki	126/70	3 900/...	.../279	на территории Финляндии in Finland
Уксунйоки Uksunjoki	121	1 080	58,2	оз. Куйккаярви Lake Kuikkayarvi
Важинка Vazhinka	123	2 020	53,8	

Окончание табл. 3  
Table 3 (continued)

Название реки River name	Длина, км Length, km	Площадь водосбора, км <sup>2</sup> Catchment area, km <sup>2</sup>	Площадь озер на водосборе, км <sup>2</sup> Area of lakes in the catchment area, km <sup>2</sup>	Принятый исток Accepted source
1	2	3	4	5
Бассейн Онежского озера The basin of Lake Onega				
Шуя Shuya	194	10 100	1 071	оз. Суоярви Lake Suoyarvi
Суна Suna	280	7 670	987	оз. Кивиярви Lake Kiviyarvi
Водла Vodla	149	13 700	723	слияние рек Сухая Водла и Вама confluence of the Sukhaya Vodla and Vama Rivers
Илекса Ileksa	155	3 950	122	оз. Калгачинское Lake Kalgachinskoye
Нетома Netoma	107	776	6,5	оз. Нетомское Lake Netomskoye
Колода Koloda	112	1 330	35	оз. Глубокое Lake Glubokoye
Шалица Shalitsa	104	992	61,1	оз. Шалозеро Lake Shalozero

*Примечание.* Данные по р. Суне даны для водосбора в естественном состоянии. В числителе приводятся данные для всего водосбора, в знаменателе – для территории России. Многоточие обозначает отсутствие данных.

*Note.* Data on the Suna River are given for the catchment area in its natural state. The numerator contains data for the entire catchment area, and the denominator – for the territory of Russia. (...) – no data.

Близость к водоразделам основных базисов эрозии обусловила значительное падение рек. Большая часть его величины (80–90 %) приходится на пороги и карешки (небольшие порожки). Для малых рек величина падения может достигать 10 м/км (р. Неглинка) при преимущественной 2–5 м/км. Более крупные реки имеют меньшее удельное падение, редко превышающее 1 м/км, но и на них сосредоточенные падения на отдельных участках достигают значительных величин.

Характерной особенностью карельской гидрографии являются также узкие невысокие водоразделы и близость соседних водотоков, что создает условия для переброски стока в другие бассейны (р. Суна – оз. Палье, р. Поньгома – оз. Топозеро). А сложный изрезанный рельеф в условиях водораздельного расположения озер часто определяет сток из них по нескольким направлениям одновременно: оз. Энгозеро – реки Калга и Воньга, оз. Сариярви – реки Лоймоланйоки (Тулемайоки) и Пенсанйоки (Уксунйоки), оз. Сегежское – реки Обжанка и Сегежа (приток р. Свири).

### Запасы воды и водные ресурсы

Основной объем пресной воды аккумулируется в водоемах. Так, в водохранилищах (без

Верхне-Свирского) содержится 80,2 км<sup>3</sup>. Из них общая полезная емкость составляет 18,6 км<sup>3</sup>, что позволяет регулировать 47 % годового объема речного стока. Еще 65 км<sup>3</sup> воды сосредоточено в озерах, остающихся в естественном состоянии. Кроме того, к этим цифрам следует добавить большие части объемов Онежского (Верхне-Свирское водохранилище) и Ладожского озер. Основная часть вод, содержащихся в водоемах (78 %), находится в бассейне Белого моря, где они представлены главным образом водами водохранилищ. Здесь расположено около 90 % общей полезной емкости водохранилищ, регулируется 63 % объема речного стока.

В балтийском бассейне воды сосредоточены в основном в озерах, сток менее зарегулирован и реки менее водоносны.

Пресные воды, накапливаемые в озерах и водохранилищах, относятся к стационарным запасам или вековым водным ресурсам с очень низкой скоростью возобновления. При современном водохозяйственном планировании их интенсивное использование обычно не предусматривается из-за возможных отрицательных экологических последствий. Как водные ресурсы эти объекты можно рассматривать лишь с точки зрения способов использования, не меняющих их количественных параметров (водный транспорт, рекреация, рыбное хозяйство).

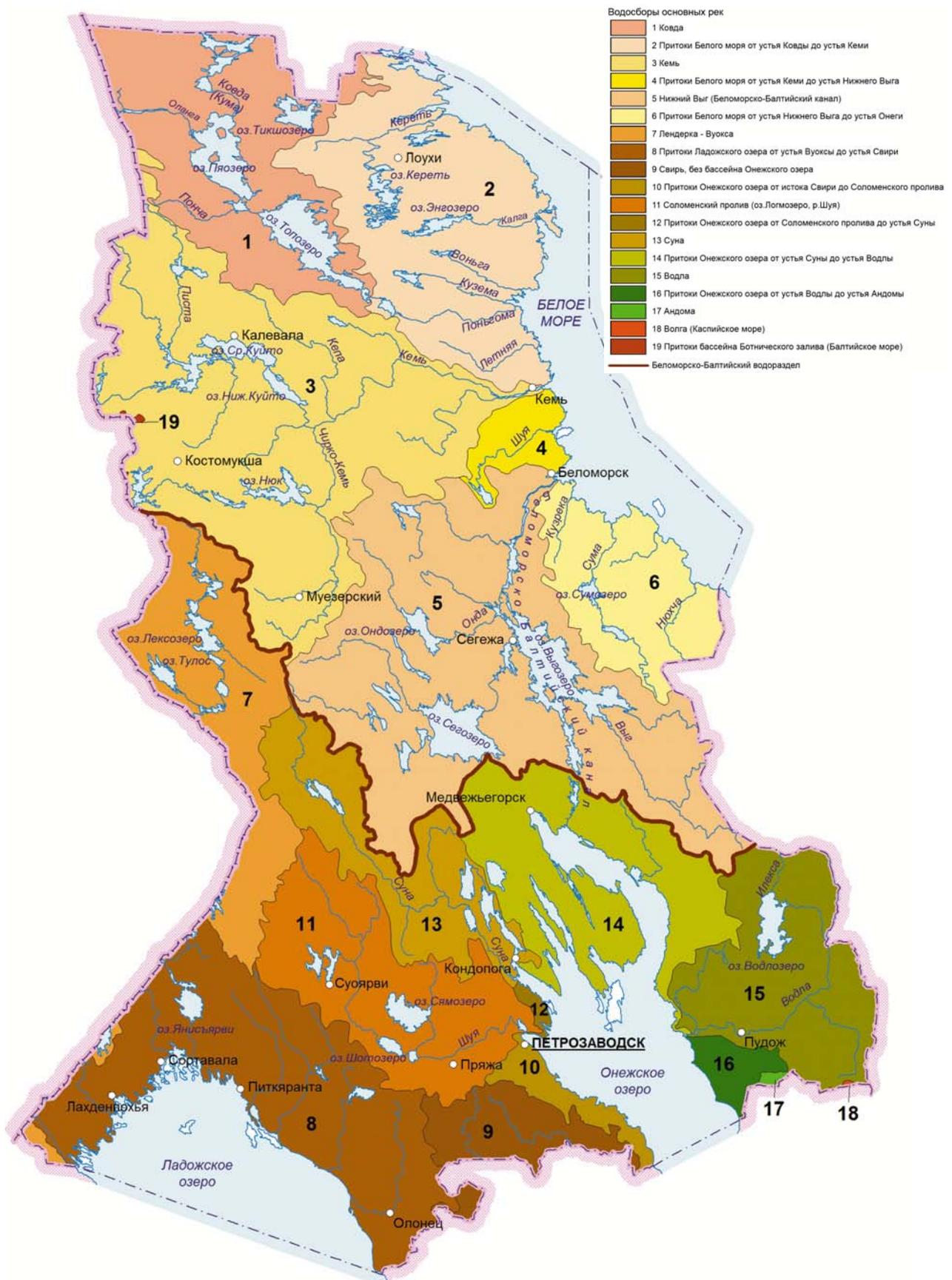


Рис. 4. Водосборы основных водных систем  
 Fig. 4. The catchments of the main water systems

Для водопотребляющих отраслей экономики наибольший интерес представляют динамические, непрерывно возобновляющиеся запасы. А ими является речной сток. Подсчитано, что вследствие круговорота воды в природе запас воды в руслах всех рек Земного шара возобновляется 23 раза в год, или один раз в 16 суток. И если его одномоментный объем составляет 2120 км<sup>3</sup>, то средний годовой объем стока всех рек Земли достигает 46 тыс. км<sup>3</sup>. Именно он и является основным видом водных ресурсов. Следует также помнить, что речной сток является очень существенным (наряду с атмосферными осадками) источником пополнения озерных и подземных вод.

На большей части республики средний многолетний модуль речного стока колеблется в районе 10 л/сек·км<sup>2</sup>, так как большое количество озер на водосборах в сочетании с болотами и заболоченными лесами, которые занимают около 30 % площади, нивелируют величину среднего многолетнего стока по территории. Однако подстилающая поверхность и орографические особенности местности оказывают значительное влияние на распределение осадков, а следовательно, и связанного с ними стока по территории. На севере республики наибольшие величины годового стока (11–12 л/сек·км<sup>2</sup>) наблюдаются на возвышенных участках (Северный возвышенный район с высотами 300–400 м и более над уровнем моря). На Прибеломорской низменности и в понижениях у крупных озер-водохранилищ сток уменьшается до 8–9 л/сек·км<sup>2</sup>. В южной части Карелии максимальные значения стока (12–16 л/сек·км<sup>2</sup>) отмечаются на северо-восточных притоках Ладожского и восточных притоках Онежского озер.

Объем стока рек Карелии в средний по водности год составляет 57 км<sup>3</sup>. Непосредственно на ее территории формируется 49,7 км<sup>3</sup> (так называемый «местный сток»). Остальные воды (13 %) поступают из сопредельных регионов (в основном из Финляндии и Архангельской области). Около 55 % речного стока с территории республики поступает в Белое море, 25 % – в Онежское и 20 % – в Ладожское озера [Литвиненко и др., 2006].

Учитывая многолетние колебания речного стока и исходя из условий наиболее полного удовлетворения в воде всех отраслей экономики, в водохозяйственной практике ориентируются на сток маловодного года, как правило, 95%-й обеспеченности (повторяемость в среднем один раз в 20 лет). В таких условиях местный сток составляет 63 % от среднемноголетнего, или 31,8 км<sup>3</sup>.

Абсолютные показатели не дают полного представления об обеспеченности водными ресурсами. Более наглядны относительные характеристики – объем речного стока, приходящийся на единицу площади или одного жителя. Так, на 1 км<sup>2</sup> территории Карелии приходится 331 тыс. м<sup>3</sup>, а на одного жителя республики 93 тыс. м<sup>3</sup> суммарного речного стока, что больше среднероссийских показателей в 1,3 и 3 раза соответственно. Здесь следует отметить, что другой важный вид водных ресурсов – подземные воды – изучен значительно слабее, а их запасы и объемы использования гораздо ниже [Богачев и др., 2006].

Таким образом, обеспеченность Карелии поверхностными водными ресурсами достаточно высока и количественные параметры не являются фактором, лимитирующим развитие экономики республики (даже учитывая внутригодовую неравномерность речного стока). Существующие проблемы с водоснабжением населения и отдельных хозяйственных объектов имеют либо организационно-технический характер, либо связаны с несоответствием качества воды природных источников предъявляемым требованиям. А качество карельских поверхностных вод в плане потребительских свойств имеет свою специфику. Некоторые ученые даже выделяют отдельный «карельский» химический тип вод.

В качестве приоритетных показателей, отражающих специфику химического состава вод региона, приняты: минерализация воды и ее жесткость, рН, содержание органических веществ, железа. Поверхностные воды Карелии относятся к категории очень маломинерализованных и очень мягких. На большей части территории они имеют минерализацию до 25 мг/л и жесткость 0,2–0,4 мг-экв/л. Небольшую площадь занимают озера и реки с минерализацией 40–100 мг/л. Водоемов с суммой ионов свыше 100 мг/л известно не более 10. По этим показателям они соответствуют принятым в Российской Федерации нормативам для питьевого водоснабжения (до 1 000 мг/л). Нижние показатели минерализации не нормируются, но известно, что оптимальными для человека являются более высокие ее значения – до 300–400 мг/л. Таким образом, по этому показателю поверхностные воды Карелии не являются качественными, так как основным источником поступления в организм человека минеральных солей является именно вода. Однако они являются очень качественными для некоторых видов технического использования (теплообменные аппараты – паровые котлы, испарители, пароперегреватели и т. п.) и в быту (чайники,

стиральные машины, утюги), так как при нагревании не дают большого количества накипи.

По величине рН большую часть поверхностных вод Карелии можно отнести к слабокислым (рН 5,5–6,5) и нейтральным (рН 6,5–7,5), что вполне соответствует требованиям, предъявляемым к питьевым водам.

Наиболее проблемный показатель – цветность воды. В настоящее время в Карелии почти во всех существующих поверхностных источниках водоснабжения наблюдается превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) по этому показателю. Цветность воды обусловлена присутствием в ней органических веществ (ОВ) гумусового происхождения. Для значительной части территории республики (до 35 %) характерны воды со средним для условий Карелии содержанием ОВ (цветность 35–80 градусов платиново-кобальтовой шкалы). На 20 % территории распространены воды с высоким содержанием ОВ (цветность 80–160 градусов). Приблизительно такое же распространение имеют воды с низкой гумозностью (менее 35 градусов).

Гумусовые вещества обладают хорошей комплексообразующей способностью и образуют с железом, марганцем и многими другими металлами прочные комплексные соединения. Поэтому для высокоцветных вод характерно высокое содержание железа и марганца, которое также часто превышает ПДК [Литвиненко и др., 1998; Морозов, Литвиненко, 2006].

### **Антропогенные преобразования гидрографической сети**

Достаточно сложное строение гидрографической сети Карелии предопределило и необходимость ее структурных преобразований для наиболее рационального использования ее потенциала. Основными «заказчиками» таких гидротехнических проектов являются гидроэнергетика и водный транспорт. В меньшей степени (для Карелии) это водоснабжение и рекреация. Следует также отметить и молевой лесосплав, который активно развивался в Карелии в 1950–80-е годы, когда были построены десятки деревянных лесосплавных плотин для обеспечения этого вида водопользования. Но в настоящее время этот вид деятельности прекращен (последний проплав древесины по р. Водле прошел в 1995 г.), и сейчас практически все плотины разрушены.

Все реализованные и планируемые гидротехнические проекты в небольшой статье осветить невозможно, поэтому остановимся на двух наиболее значимых и ярких.

Основной водотранспортной артерией Карелии является Беломорско-Балтийский канал (ББК), входящий в систему Беломорско-Балтийского водного пути. Построен в рекордные сроки между 1931 и 1933 годами. Начинается у пос. Повенец в Повенецкой губе Онежского озера и заканчивается у г. Беломорска в Сорокской губе Белого моря. Сооружен на базе природных водных объектов: р. Повенчанка, озера Волозеро, Маткозеро, Телецкое, Выгозеро, р. Нижний Выг. Общая протяженность Беломорско-Балтийского канала 227 км (из них 37,1 км – искусственные пути). В комплекс сооружений канала входят 19 шлюзов 15 плотин, пять гидроэлектростанций и ряд других объектов.

Сразу за Повенцом на небольшом расстоянии друг от друга расположены семь шлюзов, составляющие Южный (Балтийский) склон протяженностью около 10 км и высотой почти 70 м. Между седьмым и восьмым шлюзами находится водораздельный бьеф канала протяженностью 22 км. На участке Северного (Беломорского) склона протяженностью около 190 км расположено двенадцать шлюзов. Разность уровней воды здесь 102 м.

И теперь из Онежского озера можно попасть в любую точку Мирового океана не выходя на сушу, двигаясь по одному из трех маршрутов: на запад по системе р. Свирь – Ладожское озеро – р. Нева – Балтийское море – Атлантический океан; на юг по системе Волго-Балтийский канал – р. Волга – Волго-Донский канал – Черное море – Средиземное море – Атлантический или Индийский океан и на север по системе ББК – Белое море – Северный Ледовитый океан – Северный морской путь – Тихий океан.

В сфере гидроэнергетики наибольший интерес имеет гидротехническое преобразование р. Суны, не имеющее аналогов в мире.

Планомерное и целенаправленное освоение гидроресурсов Карелии началось в 20-е годы XX в., когда была образована Государственная комиссия по электрификации России, разработавшая общеизвестный план ГОЭЛРО. Согласно ему в Карелии предполагалось строительство ряда ГЭС на реках Суна, Выг и Кемь.

Первые проекты использования гидроресурсов р. Суны, и в частности водопада Кивач, разрабатывались еще в 1902–1913 гг. Однако они предполагали строительство на самой реке в районе водопада ГЭС небольшой мощности (до 7 тыс. кВт), что было явно недостаточно. Инженер Генрих Иосифович Графтио, впоследствии академик, крупнейший советский гидротехник, руководитель строительства Волховской и Нижнесвирской ГЭС, предложил

свою очень оригинальную схему использования падения реки, базирующуюся на особенностях гидрографического строения ее бассейна.

Изначально р. Суна впадала в Кондопожскую губу Онежского озера несколько южнее ее вершины (в районе д. Янишполе). Неподалеку от устья она принимала достаточно крупный приток – озерно-речную систему Сандалку, имеющую в своем составе два крупных озера – Палье и Сандал (рис. 5).

По идее Г. И. Графтио предполагалось построить на р. Суне выше водопада Кивач плотину, подпирающую Сундозеро, и переадресовать сток реки по каналу в оз. Сандал. Сток из него, опять-таки искусственным путем, направлялся бы в Кондопожскую губу, на берегу которой сооружалась Кондопожская ГЭС. Чтобы исключить непродуктивные потери, в истоке р. Сандалки из оз. Сандал сооружалась глухая плотина. По этой схеме напор воды, используемой на ГЭС,

увеличивался почти в 2,5 раза по сравнению с используемым напором р. Суны непосредственно на Киваче. Возрастал и расход воды за счет стока бассейна оз. Сандал. Кроме того, на базе этого водоема создавалось водохранилище для непосредственного регулирования работы Кондопожской ГЭС. Таким образом, впервые в практике отечественного гидростроительства была предложена идея своеобразного обогащения напора и расхода воды. Несколько позднее эту схему усовершенствовал инженер Валериан Владимирович Болотов, впоследствии профессор Ленинградского политехнического института, заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Он предложил перехватить сток р. Суны не у водопада Кивач, а на водопаде Гирвас и направить ее воды в оз. Палье. Оттуда они через р. Нивку-Тивдийку должны были поступить в оз. Сандал и далее на турбины Кондопожской ГЭС.

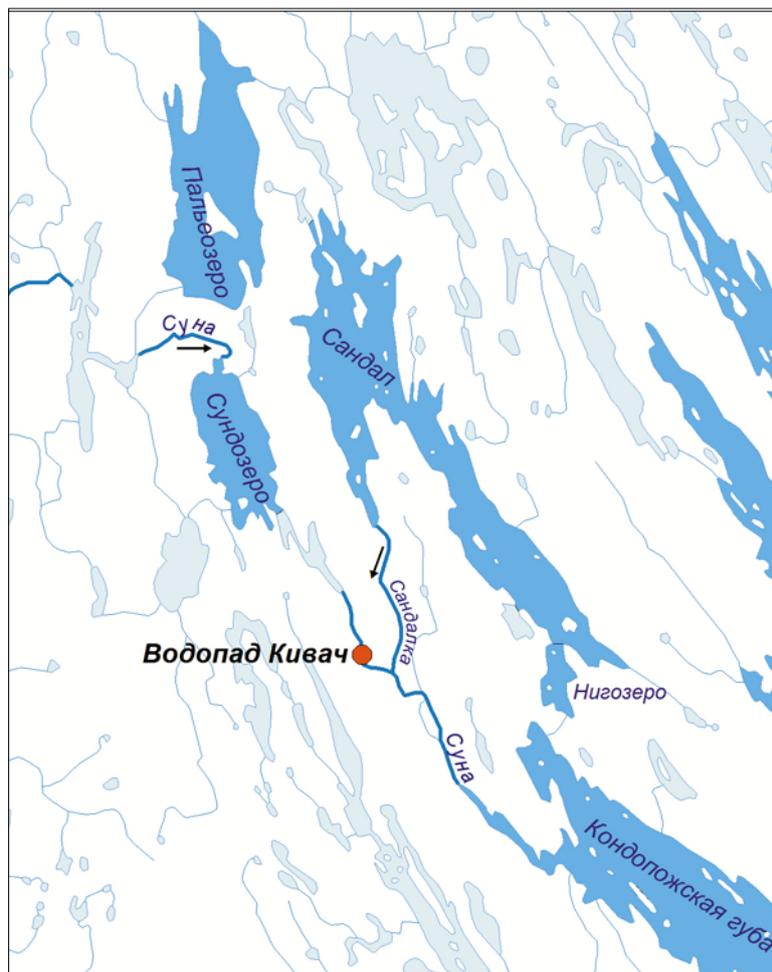


Рис. 5. Природная гидрографическая схема нижнего течения р. Суны (естественное состояние)

Fig. 5. Natural hydrographic scheme of the lower reaches of the Suna River (natural state)

Перепад между р. Суной и оз. Палье (около 26 м) предполагалось дополнительно использовать на Пальеозерской ГЭС. Именно этот вариант каскада Сунских ГЭС, один из наиболее интересных и оригинальных в истории мировой гидротехники, и был реализован (рис. 6). В результате этих преобразований уровень оз. Сандал повысился на 2 м, площадь акватории возросла на 10 %, а площадь водосбора увеличилась в 58 раз, что само по себе является уникальным явлением.

Следует упомянуть, что первым начальником и главным инженером Кондостроя был известный советский гидростроитель Д. И. Верещагин, а его заместителем – Сергей Владимирович Григорьев, впоследствии организатор и многолетний руководитель Отдела водных проблем.

Необходимо также отметить еще одно оригинальное инженерное решение, найденное

при прокладке канала р. Суна – оз. Палье, получившего название Пионерный. Согласно расчетам, для его сооружения требовалась выемка грунта объемом около 2 млн м<sup>3</sup>. Столь большая цифра была обусловлена тем, что Суно-Пальеозерский перешеек сложен тонкими аллювиальными песками, требующими очень пологих откосов канала. Инженер Георгий Васильевич Клишевич, впоследствии доктор технических наук, предложил очень экономичный вариант, позволивший обернуть этот недостаток во благо. От реки до озера была прорыта неглубокая канава, по которой пустили сунские воды. Из-за существенного перепада высот (26 м) и высокой размываемости песков в течение примерно года водный поток проделал канал нужных параметров. Правда, при этом в оз. Палье было вынесено уже 7 млн м<sup>3</sup> грунта [Григорьев, 1961; Литвиненко, 19996].



Рис. 6. Реализованная схема использования водных ресурсов нижнего течения р. Суны (современное состояние)

Fig. 6. Implemented scheme of water resources use in the lower reaches of the Suna River (current state)

Строительство Сунского гидроэнергетического каскада сыграло очень большую роль в развитии экономики Карелии, но при этом повлекло значительные экологические последствия. В частности, нижнее течение р. Суны оказалось искусственно отрезанным от основной системы, и здесь теперь сформировался новый водоток (Нижняя Суна) с водным режимом, существенно отличающимся от исходного. Кардинально изменился водный режим озер Палье, Сандал и Нигозеро, рек Нивки-Тивдийки и Сандалки. Нанесен непоправимый ущерб Сунским водопадам: на месте Гирваса (падение 16,8 м) сооружена плотина, Пор-порог (14,8 м) полностью обсох, Кивач (10,7 м) потерял большую часть своей мощи. В результате гидротехнического строительства в Карелии были уничтожены и еще ряд примечательных водопадов: Воицкий (падение 7,2 м) на р. Нижний Выг, Ужма (11,8 м) и Юма (2,3 м) на р. Кемь, Софьянгийский (9 м) на р. Ковда.

Помимо Сунского каскада ГЭС подобные каскады были сооружены на реках Нижний Выг (Ондская, Палокоргская, Маткожненская, Выгостровская, Беломорская), Кемь (Юшкозерская, Белопорожская, Кривопорожская, Подужемская, Путкинская), Ковда (Кумская, Иовская, Князегубская). Также функционируют ряд небольших ГЭС в юго-западной части Республики Карелия, сооруженные еще до Второй мировой войны Финляндией, и ряд современных малых ГЭС.

## Заключение

Рассмотренные выше природные особенности гидрографии и водных ресурсов Карелии в совокупности с определяющими их климатическими и геолого-геоморфологическими условиями оказывают заметное влияние на характер развития водного хозяйства республики и наиболее существенные водно-экологические проблемы. Основные результаты этого влияния следующие:

1. Малая водоносность рек обуславливает тяготение наиболее крупных водоемких производств и населенных пунктов к большим водоемам, обладающим значительными запасами водных ресурсов для промышленного и коммунально-бытового водоснабжения, или к устьям крупных рек. Соответственно, основные объемы загрязняющих веществ от точечных источников поступают именно в такие водные объекты. Поэтому наиболее загрязнены крупные акватории, непосредственно примыкающие к основным промышленным центрам, – Кондопожская, Петрозаводская и Большая

губы Онежского озера, Выгозеро и Беломорско-Балтийский канал, северная часть Ладоги, оз. Суоярви. Во многих из этих районов проявляются и признаки антропогенного эвтрофирования, чему способствует и функционирование здесь биологических очистных сооружений.

2. Значительное сосредоточенное падение рек на ограниченных участках создает предпосылки для их энергетического использования, а узкие невысокие водоразделы – для привлечения в этих целях стока из соседних бассейнов. Наличие большого числа озер, входящих в озерно-речные системы, позволяет зарегулировать водотоки с меньшими затратами (путем создания озер-водохранилищ). Но в силу низкой водности рек мощность ГЭС невелика (до 180 МВт), и одна гидроэнергетика не может полностью покрыть энергетические потребности Карелии.

3. Ступенчатость продольного профиля, небольшая протяженность и сильная порожи́стость рек сводит к минимуму возможности их использования для судоходства. По этим же причинам большинство крупных глубоководных озер отрезаны от основного для республики Беломорско-Балтийского водного пути, и здесь существуют лишь некоторые условия для организации местного каботажного судоходства. В силу этого эпизодические загрязнения нефтепродуктами характерны только для водных объектов, входящих в состав названного выше водного пути (Ладожское и Онежское озера, Беломорско-Балтийский канал, Белое море). Для внутренних водоемов существует только риск, связанный с развитием там маломерного флота.

4. Большие удельные падения, порожи́стость, незначительный твердый сток, сравнительно устойчивый (зарегулированный озерами) водный режим карельских рек определяют их нерестовую ценность для проходных лососевых рыб.

5. Большой озерный фонд, значительная протяженность нерестовых рек, богатство ихтиофауны создают широкие возможности для развития в регионе рыбного хозяйства (промысел, товарное рыбоводство, акклиматизационные работы). Широкое развитие в настоящее время садкового рыбоводства привело к появлению проблемы локального антропогенного эвтрофирования и загрязнения.

6. Огромное разнообразие чрезвычайно живописных и экзотичных водных объектов предопределяет интерес к ним со стороны рекреации, особенно водного туризма и спортивного и любительского рыболовства. Это обуславливает необходимость разработки уже сейчас

комплекса природоохранных мероприятий для такого рода деятельности.

7. Большие запасы поверхностных водных ресурсов при относительно небольших подземных обуславливают незначительное использование последних, хотя в настоящее время они привлекают все больший интерес, главным образом в связи с неудовлетворительным качеством поверхностных вод.

8. Химический состав поверхностных вод имеет определенную специфику, обусловленную природными особенностями региона. большей частью они ультрапресные, с низкой жесткостью, повышенным содержанием органических веществ и железа. Вследствие этого они характеризуются незначительной самоочистительной способностью и буферной емкостью и весьма чувствительны к антропогенному воздействию, в том числе к закислению и эвтрофированию.

9. Высокое содержание в поверхностных водах органических веществ и железа и низкое – минеральных солей и фтора затрудняет организацию питьевого водоснабжения. Это связано как со слабым развитием систем водоподготовки и водоподачи, так и с низкой эффективностью процесса коагуляции (основного метода обесцвечивания), обусловленной спецификой вод карельского гидрографического региона – ультрапресных, с низкими температурами в течение большей части года.

*Автор выражает благодарность за большую помощь в подготовке картографических материалов главному специалисту по научно-технической информации ИВПС КарНЦ РАН О. В. Дерусовой.*

## Литература

Богачев М. А., Бородулина Г. С., Игонин А. А. Гидрогеологические условия и ресурсы подземных вод // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. С. 113–127.

Гашева В. Ф. Некоторые особенности гидрографии КАССР // Сб. работ Ленинградской гидрометеорологической обсерватории. 1967. Вып. 4. С. 103–114.

Государственный водный кадастр. Раздел 1. Серия 3. Многолетние данные о режиме и ресурсах вод суши. Ч. 1, 2. Т. 1. РСФСР. Вып. 5. Бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озер. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 688 с.

Государственный водный кадастр. Раздел 1. Серия 3. Многолетние данные о режиме и ресурсах вод суши. Ч. 1, 2. Т. 1. РСФСР. Вып. 7. Бассейны рек

западного побережья Белого моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 220 с.

Григорьев С. В. Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1961. 140 с.

Григорьев С. В., Грицевская Г. Л. Каталог озер Карелии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 240 с.

Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2001. 300 с.

Литвиненко А. В. Гидрографическая сеть Карелии и ее особенности // Экологическое исследование природных вод Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. С. 8–13.

Литвиненко А. В. К истории гидроэнергетического освоения водных объектов Карелии // Экологическое исследование природных вод Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. С. 21–27.

Литвиненко А. В., Карпечко В. А., Филатов Н. Н. Особенности гидрографии // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. С. 65–74.

Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Лозовик П. А., Карпечко В. А. Региональная экология: эколого-экономические основы рационального использования водных ресурсов Карелии // Инженерная экология. 1998. № 6. С. 3–5.

Морозов А. К., Литвиненко А. В. Требования, предъявляемые к питьевой воде // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / Ред. Н. Филатов, А. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. Регеранд. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. С. 87–92.

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

Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад / Под ред. Е. Н. Таракановой; Гл. упр. гидрометеорол. службы. Сев.-Зап. упр. гидрометеорол. службы. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 700 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад / Под ред. В. Е. Водогрецкого. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 528 с.

## References

Bogachev M. A., Borodulina G. S., Igonin A. A. Hydrogeological conditions and groundwater resources. *Vodnye resursy Respubliki Kareliya i puti ikh ispol'zovaniya dlya pit'evogo vodosnabzheniya. Opyt karel'sko-finlyandskogo sotrudnichestva = Water resources of the Republic of Karelia and ways of their use for drinking water supply. Experience of Karelian-Finnish cooperation.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. P. 113–127. (In Russ.)

Filatov N. N., Litvinenko A. V. (eds.). A catalogue of lakes and rivers in Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. 300 p. (In Russ.)

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

Gasheva V. F. Some features of the hydrography of the KASSR. *Sb. rabot Leningradskoi gidrometeoobseruatorii = Proceed. of the Leningrad Hydrometeorological Observatory*. 1967. Iss. 4. P. 103–114. (In Russ.)

Grigor'ev S. V. Water resources of Karelia and their use. Petrozavodsk: Gosizdat Karel'skoi ASSR; 1961. 140 p. (In Russ.)

Grigor'ev S. V., Gritsevskaya G. L. A catalogue of lakes in Karelia. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1959. 240 p. (In Russ.)

Litvinenko A. V. Hydrographic network of Karelia and its features. *Ekologicheskoe issledovanie prirodnykh vod Karelii = Environmental research on natural waters of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. P. 8–13. (In Russ.)

Litvinenko A. V. On the history of hydropower development of water bodies of Karelia. *Ekologicheskoe issledovanie prirodnykh vod Karelii = Environmental research on natural waters of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. P. 21–27. (In Russ.)

Litvinenko A. V., Karpechko V. A., Filatov N. N. Features of hydrography. *Vodnye resursy Respubliki Kareliya i puti ikh ispol'zovaniya dlya pit'evogo vodospobzheniya. Opyt karel'sko-finlyandskogo sotrudnichestva = Water resources of the Republic of Karelia and ways of their use for drinking water supply. Experience of Karelian-Finnish cooperation*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. P. 65–74. (In Russ.)

Litvinenko A. V., Filatov N. N., Lozovik P. A., Karpechko V. A. Regional ecology: ecological and economic principals of the rational use of water resources in Karelia. *Inzhenernaya ekologiya = Engineering Ecology*. 1998;6:3–5. (In Russ.)

Morozov A. K., Litvinenko A. V. Requirements for drinking water. *Vodnye resursy Respubliki Kareliya i puti ikh ispol'zovaniya dlya pit'evogo vodospobzheniya. Opyt karel'sko-finlyandskogo sotrudnichestva = Water resources of the Republic of Karelia and ways of their use for drinking water supply. Experience of Karelian-Finnish cooperation*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. P. 87–92. (In Russ.)

State cadastre of water resources. Section 1. Series 3. Long-term data on the regime and resources of inland waters. Parts 1, 2. Vol. 1. RSFSR. Iss. 5. River basins of the Baltic Sea, Lakes Ladoga and Onego. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1986. 688 p. (In Russ.)

State cadastre of water resources. Section 1. Series 3. Long-term data on the regime and resources of inland waters. Parts 1, 2. Vol. 1. RSFSR. Iss. 7. River basins of the western coast of the White Sea. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1987. 220 p. (In Russ.)

Tarakanova E. N. (ed.). Surface water resources of the USSR. Hydrological state of knowledge. Vol. 2. Karelia and North-West. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1965. 700 p. (In Russ.)

Vodogretskii V. E. (ed.). Surface water resources of the USSR. Vol. 2. Karelia and North-West. Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1972. 528 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 26.10.2023; принята к публикации / accepted: 03.11.2023.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Литвиненко Александр Васильевич**

старший научный сотрудник лаборатории гидрографии и гидрологии

#### CONTRIBUTOR:

**Litvinenko, Alexander**

Senior Researcher

УДК 556.556 : 551.511.6

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВОДНОЙ МАССЫ НЕБОЛЬШОГО ОЗЕРА ПРИ НОЧНОМ ВЫХОЛАЖИВАНИИ

С. Р. Богданов<sup>1\*</sup>, Г. Э. Здоровеннова<sup>1</sup>, Р. Э. Здоровеннов<sup>1</sup>,  
И. А. Максимов<sup>2</sup>, Н. И. Пальшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),

\*Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ул. Красноказарменная, 14,  
стр. 1, Москва, Россия, 111250)

Приводятся результаты изучения режима перемешивания небольшого по площади озера, ветровое воздействие на водную толщу которого существенно ослаблено залесенностью прилегающей береговой территории. Измерения температуры с помощью цепочки термисторов осуществлялись в период открытой воды в течение двух сезонов, в 2021 и 2023 гг. Основное внимание было уделено периодам ночного поверхностного выхолаживания, поскольку именно этот механизм можно считать преобладающим в перемешивании водной массы и образовании конвективно-перемешанного поверхностного слоя на этапе летнего нагревания. При этом, несмотря на значительные ночные потоки тепла на поверхности, полного перемешивания не происходит. Анализ динамики температурного профиля и расчет эффективности перемешивания осуществлен с помощью интегрального энергетического метода, на основе выделения эпизодов перемешивания и расчетов базовой потенциальной энергии и потока плавучести. Для эффективности перемешивания по двум сезонам получены оценки 0,45 и 0,49, существенно превышающие каноническое значение 0,17. Обнаружено также, что значение эффективности зависит от толщины перемешанного слоя.

Ключевые слова: малое озеро; поверхностное выхолаживание; базовая потенциальная энергия; поток плавучести; эффективность перемешивания

Для цитирования: Богданов С. Р., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Максимов И. А., Пальшин Н. И. Особенности перемешивания водной массы небольшого озера при ночном выхолаживании // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 25–38. doi: 10.17076/lim1874

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН).

**S. R. Bogdanov<sup>1\*</sup>, G. E. Zdorovenova<sup>1</sup>, R. E. Zdorovenov<sup>1</sup>, I. A. Maksimov<sup>2</sup>,  
N. I. Palshin<sup>1</sup>. FEATURES OF MIXING THE WATER MASS OF A SMALL LAKE  
DURING NIGHT COOLING**

<sup>1</sup> Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

<sup>2</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14-1 Krasnokazarmennaya St.,  
111250 Moscow, Russia)

The article presents the results of a study of the mixing regime of a small lake, the wind effect on the water column of which is significantly weakened by the forest cover of the adjacent coastal area. Temperature measurements using a chain of thermistors were carried out during two open seasons, in 2021 and 2023. The main attention was paid to periods of night cooling, since it is this mechanism that can be considered prevalent in the mixing of the water column and the formation of a convectively mixed surface layer. Wherein, in the summer months, despite significant nighttime heat fluxes on the surface, complete mixing does not occur. The analysis of the dynamics of the temperature profile and the calculation of the efficiency of mixing were carried out using the integral energy method, based on the identification of mixing episodes and calculations of the background potential energy and buoyancy flux. For mixing efficiency, estimates of 0.45 and 0.49 were obtained for two seasons, significantly exceeding the canonical value of 0.17. It was also revealed that the efficiency value depends on the shape of the density profile and, in particular, on the thickness of the mixed layer.

**Keywords:** small lake; surface cooling; background potential energy; buoyancy flux; mixing efficiency

For citation: Bogdanov S. R., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Maksimov I. A., Palshin N. I. Features of mixing the water mass of a small lake during night cooling. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 25–38. doi: 10.17076/lim1874

**Funding.** The article was prepared using federal budget funding under state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

---

**Введение. Литературный обзор  
и постановка задачи**

Закономерности формирования и тренды в изменениях режима перемешивания озер остаются приоритетными задачами лимнологии, особенно в условиях климатических изменений и усиления антропогенного воздействия на водные объекты. Эти закономерности во многом определяют параметры важнейших экологических процессов, например газообмена (прежде всего таких активных газов, как CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>) через водную поверхность [Read et al., 2012]. Особенности режима перемешивания озер играют также большую роль в изучении глобальных процессов, например, углеродного цикла [Cole et al., 2007].

Основу количественного описания режима перемешивания составляет изучение особенностей турбулентного теплопереноса в водной толще. При этом турбулентность возникает как результат различных внешних воздействий, среди которых наиболее важны механическое (ветровое) перемешивание, а также

радиационные факторы, связанные с неоднородным нагревом или охлаждением. При этом, как известно, лишь часть внешней нагрузки энергии затрачивается собственно на перемешивание, перестройку температурного и плотностного профилей; остальная часть энергии диссипируется в тепло. Отношение этих энергий – коэффициент перемешивания  $\Gamma$  – играет ключевую роль в изучении различных механизмов перемешивания, как и смежный с ним параметр  $\eta = \Gamma / (1 + \Gamma)$  – эффективность перемешивания.

В ряде ранних работ, основанных на анализе океанологических данных, сформулировано предположение о постоянном, универсальном значении этого параметра и предложена оценка  $\Gamma \sim 0,20$  (см. обзор в [Gregg et al., 2018]). Однако исследования последних лет [Bluteau et al., 2013; Maffioli et al., 2016] свидетельствуют о том, что величины  $\Gamma$  и  $\eta$  не являются константами, эффективность перемешивания существенно зависит как от параметров турбулентности, вызывающей перемешивание [Maffioli et al., 2016], так и от состояния

водоема непосредственно перед эпизодом перемешивания [Davies Wykes et al., 2015; Solserova et al., 2019]. Вывод выражений, конкретизирующих вариативность  $\Gamma$ , представляет собой, однако, весьма сложную задачу. В частности, такие исследования затруднены тем, что, как правило, перемешивание происходит под одновременным воздействием нескольких механизмов, и алгоритмы разделения вкладов каждого из них находятся лишь в стадии предварительной разработки [Read et al., 2012].

Косвенным индикатором сложностей изучения перемешивания служат также известные проблемы классификации озер по параметрам режима перемешивания. При этом в отличие от крупных озер вопросы, связанные с классификацией малых и мелких озер и прудов (обычно определяемых по условной границе площади зеркала – 5 гектаров) по особенностям их термического цикла и режимов перемешивания, во многом остаются открытыми [Kirillin, Shatwell, 2016]. В частности, в работе [Holgerson et al., 2022] показано, что для малых озер и прудов режим перемешивания весьма чувствителен по отношению даже к малым изменениям площади и глубины  $H$ . Между тем актуальность и значимость подобных вопросов в последние годы все более возрастает, в частности, в связи с предполагаемым усилением эмиссии (эвазии) метана от мелких озер и прудов арктической зоны в условиях потепления климата [Negandhi et al., 2013; Rehder et al., 2023].

Методы, используемые для количественного описания перемешивания в озерах, весьма разнообразны; различают, например, локальные и интегральные, динамические и энергетические. При этом, однако, их имплементация все еще сопряжена с рядом нерешенных теоретических проблем или с ограничениями, связанными с доступностью экспериментальных данных. Количественные оценки, получаемые при использовании различных методов, существенно (иногда на порядок и более [Bluteau et al., 2013]) отличаются. В этой связи в задачах классификации малых озер часто применяются и сугубо эмпирические подходы, основанные на статистической обработке опытных данных. Здесь, в свою очередь, возникают проблемы, связанные, например, с аморфностью параметров, используемых при постановке задач, с оценкой основных драйверов перемешивания и разделением их вкладов. Так, статус водоема нередко определяют по частоте его пребывания в перемешанном состоянии, с использованием весьма размытых качественных критериев: «редко», «часто», «эпизодически».

При этом для идентификации перемешанного состояния в качестве основного критерия часто используются достаточно условные пороговые значения градиентов плотности, и эти значения выбираются из достаточно широкого интервала (например, 0,032–0,287 (кг/м<sup>3</sup>)/м в работе [Holgerson et al., 2022]).

В настоящей работе представлен анализ режима перемешивания малого озера, основанный на применении интегрального энергетического метода. Его основное преимущество заключается в том, что для количественных оценок перемешивания используется так называемая базовая потенциальная энергия, изменение которой является прямым индикатором перестройки профиля плотности. Подробно рассмотрен лишь радиационный механизм перемешивания, обусловленный ночным выхолаживанием в летнее время. Основная задача заключалась в оценке эффективности  $\eta$  перемешивания. При этом интерес представляла не только сама величина  $\eta$  и ее возможные вариации под действием внешних параметров, но и, в контексте задач классификации малых озер, предполагаемая зависимость  $\eta$  от начального профиля температуры.

## Описание объекта и методов

Объект исследования – небольшая лесная ламба Голубая (62° 15' с. ш. 33° 15' в. д.), расположенная на водосборе р. Суны, впадающей в Онежское озеро. Ламба не имеет притоков, питание осуществляется за счет атмосферных осадков, благодаря чему вода ламбы характеризуется высокой прозрачностью. Эта особенность обуславливает радиационное воздействие на весь столб воды до дна.

Формально по площади зеркала (0,039 км<sup>2</sup>) Голубая ламба может быть отнесена к пруду, однако при максимальной глубине 8 м, в рамках предложенной в [Holgerson et al., 2022] классификации, этот объект следует относить к классу димиктических/мономиктических водоемов. Длительные измерения температуры воды на автономной станции в центре озера с октября 2020 г. по октябрь 2023 г. подтверждают этот вывод: ламба представляет собой типичный димиктический водоем, с двумя периодами полного перемешивания весной после схода льда и осенью. Стратификация водной толщи устанавливается вскоре после взлома льда в мае и существует до сентября.

В данной работе проанализированы измерения на термокесе, проведенные с 19 июня по 25 октября 2021 г. и с 7 июня по 11 октября 2023 г. Дискретность измерений составляла

одну минуту. Данные за период открытой воды 2022 г. проанализированы в статье [Богданов и др., 2023]. В 2021 г. коса с датчиками крепилась к якорю и плавающему бую, который при установке был заглублен в воду для уменьшения влияния ветрового волнения на положение приборов. Семь температурных датчиков (TR-1060 RBR Ltd, точность 0,005 °C) размещались в верхнем слое от 0,69 до 3 м через 33 см, а остальные датчики – на глубинах 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 6,5 м. При установке косы на длительный период необходимо принимать во внимание, что уже в июле конвективно-перемешанный слой (КПС) может периодически заглубляться до 4–5 м, а к концу августа – до самого дна. Поэтому в 2023 г. 14 датчиков были установлены через 0,5 м, а верхний из них – на глубине 0,25 м.

При обработке опытных данных вначале провели предварительную оценку интенсивности внешних воздействий. Для сопоставления вкладов основных драйверов перемешивания – ветрового воздействия и поверхностного выхолаживания – выполнили расчет характерных значений сдвиговой  $u^*$  и конвективной  $w^*$  скоростей. При этом оценка величины  $u^*$  осуществлялась по известным значениям скорости ветра, с учетом коэффициента ослабления (sheltering), определяемого такими факторами, как береговой склон и лес на прилегающей к ламбе территории [Read et al., 2012]. Было установлено, что указанные факторы обеспечивают эффективное естественное укрытие Голубой ламбы от ветрового воздействия, существенно ослабляют адвекцию и, соответственно, значение величины  $u^*$ , поэтому при анализе перемешивания ветровой механизм не принимался во внимание.

Определенный вклад в перемешивание могут вносить процессы взаимодействия и разрушения внутренних волн. Кроме того, на оценки энергетических параметров, осуществленные в работе [Bouffard, Wüest, 2019] в рамках одномерной модели, могут оказывать влияние сейшевые колебания. Такие оценки, однако, проводились с использованием скользящих 2-часовых средних. Такой период усреднения существенно превышает периоды волновых процессов в Голубой ламбе, так что 1D-оценки представляются приемлемыми.

Таким образом, в качестве единственного механизма перемешивания рассматривался процесс поверхностного выхолаживания. При таком механизме при температуре воды выше 4 °C возникающая при охлаждении неустойчивость приповерхностного слоя приводит к генерации доступной потенциальной энергии APE и возникновению движения жидкости.

Суть же количественного рассмотрения сводится к изучению энергетического баланса, точнее, характера распределения «накачки» между «резервуарами» потенциальной и кинетической энергии. Ключевую роль при этом играет базовая потенциальная энергия BPE, определяемая как потенциальная энергия водного столба после виртуальной процедуры адиабатного перераспределения его слоев к состоянию механического равновесия. Именно изменение BPE, как показано в [Winters et al., 1995], служит прямой количественной оценкой энергии, расходуемой собственно на перемешивание. При использовании интегрального энергетического подхода анализируются эпизоды перемешивания, при этом в начальном и конечном состояниях кинетическая энергия и доступная потенциальная равны нулю, и BPE можно отождествить с обычной потенциальной энергией и рассчитать непосредственно по начальному и конечному равновесным профилям.

Оценки эффективности  $\eta$  в рамках энергетического подхода для каждого эпизода перемешивания осуществляются на основе независимого расчета трех базовых энергетических параметров: накачки энергии  $\Delta E$ , ее вязкой диссипации  $\Delta IE$  и прироста  $\Delta BPE$  базовой потенциальной энергии:

$$\eta = \frac{\Delta BPE}{\Delta E} = \frac{\Delta BPE}{\Delta IE + \Delta BPE}. \quad (1)$$

Согласно (1) величина  $\eta$  представляет собой ту долю внешней энергетической накачки, которая расходуется собственно на перемешивание и индикатором которой является рост BPE.

Дальнейшее последовательное рассмотрение энергетических параметров проводится в рамках одномерного приближения, когда параметры считаются однородными по горизонтали. Предполагается, что крупномасштабное движение отсутствует и горизонтальной адвекцией можно пренебречь, в отличие от озер с обширными мелководными литоральными зонами [Doda et al., 2024].

Что касается накачки, ее скорость отождествлялась со скоростью генерации  $J_{APE}$  доступной потенциальной энергии (APE) (или, эквивалентно, поверхностный поток плавучести); эта величина может быть рассчитана непосредственно по поверхностному потоку тепла  $W_0$  [Guseva et al., 2021]:

$$J_{APE} = (\alpha g H / 2c) W_0, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент термического расширения,  $c$  – удельная теплоемкость,  $g$  – ускорение свободного падения. В связи с формулой (2) следует обратить внимание на абсолютные

значения потоков  $J_{APE}$  и  $W_0$ ; связывающий их безразмерный параметр  $\alpha g H / c$  весьма мал, его значение составляет по порядку  $10^{-6}$  при характерных значениях  $H \sim 10$  м и  $\alpha \sim 10^{-4}$ . Это означает, что лишь весьма малая часть потока энергии на верхней границе идет на генерацию потенциальной энергии и играет роль в процессе перемешивания [Guseva et al., 2021], что во многом обуславливает трудности изучения энергетического баланса, связанного с процессом перемешивания.

В общем случае расчет величины  $J_{APE}$  по формуле (2) осложняется тем, что для непосредственной оценки величины  $W_0$  необходимо провести целый комплекс высокоточных измерений, позволяющий оценить все компоненты энергетического баланса: длинноволновую радиацию, теплопроводность, латентный перенос тепла. В данной работе при вычислении  $W_0$  использовался альтернативный вариант, основанный на рассмотрении интегрального теплового баланса водной толщи и изменений теплозапаса столба воды за определенные промежутки времени. В случае, когда придонные потоки тепла малы, этот баланс можно представить в виде:

$$cm \frac{d\bar{T}}{dt} = -W_0. \quad (3)$$

Или, эквивалентно:  $H \frac{d\bar{T}}{dt} = -I_0$ . Здесь  $\bar{T}$  – средняя температура водной толщи,  $I_0 = W_0 / (c\rho)$  – кинематический поток тепла, К м/с.

Расчет базовой потенциальной энергии проводился для каждого момента времени после процедуры перераспределения профилей (reordering) непосредственно по формуле:

$$E_b = \int_0^{H(t)} \rho'(z, t) z dz, \quad (4)$$

где  $\rho' = \rho - \bar{\rho}$ . Значения плотности рассчитывались с использованием лимнологической версии уравнения состояния Чена – Миллеро [Chen, Millero, 1986].

При расчете потенциальной энергии по формуле (4) исключается тот прирост потенциальной энергии в конечном состоянии, который обусловлен охлаждением слоя в целом и, соответственно, увеличением средней по столбу плотности  $\bar{\rho}$ . Подробнее этот вопрос представлен в работе [Богданов и др., 2023].

Вычисление третьего энергетического параметра – вязкой диссипации – осуществлялось на основе оценок поверхностного потока плавучести  $B_s = \alpha g W_0 / (c\rho_0)$ , Вт/кг. При этом использовалось приближенное представление профиля плотности: верхняя часть водного столба (КПС) толщиной  $h_{mix}$  считалась полностью перемешанной, нижняя – линейно стратифицированной.

В рамках такого приближения поток плавучести изменяется в КПС практически линейно [Deardorff, 1970], так что его среднее значение в пределах перемешанного слоя составляет  $B_s/2$ . Соответственно, для скорости генерации  $J_{TKE}$  (Вт/м<sup>2</sup>) кинетической энергии во всем КПС получаем соотношение [Jonas et al., 2003]:

$$J^{TKE} = (\alpha g h_{mix} / 2c) W_0. \quad (5)$$

В дальнейшем величина  $J_{TKE}$  использовалась для верхней оценки диссипированной в КПС энергии. Расчет толщины КПС осуществлялся по адаптированному варианту метода, представленного в [Klaić et al., 2020]. Детали вычислений представлены в Приложении 1.

Соотношения (2)–(5) позволяют осуществить количественные оценки энергетических параметров в процессе перемешивания и, с использованием соотношения (1), рассчитать эффективность  $\eta$ . Численные значения последнего параметра играют ключевую роль при изучении режима перемешивания и в задаче классификации озер по параметрам перемешивания.

Для примера рассмотрим достаточно рафинированную, но принципиальную задачу о возможности полного перемешивания водоема в течение одного эпизода перемешивания. Предполагается, что в начальном состоянии толща воды была стратифицирована. По известной разности температур  $\Delta T$  (и, соответственно, плотностей  $\Delta \rho$ ) у поверхности и вблизи дна можно оценить начальное значение потенциальной энергии  $E_b$  и изменение  $\Delta E_b$  при переходе к полностью перемешанному состоянию:  $\Delta E_b \sim \Delta \rho g H^2$ . С другой стороны, соотношение (1) позволяет по известному значению эффективности  $\eta$  оценить необходимую для полного перемешивания внешнюю энергию  $\Delta E$ . Более того, при заданном потоке  $W_0$  нетрудно получить оценку для интервала времени  $\tau$ , необходимого для полного перемешивания вод-

ной толщи:  $\tau \sim \frac{\Delta E_p}{\eta J_{APE}} \sim \frac{c\rho}{\eta W_0} H \Delta T$ . С использованием представления  $N^2 = g \alpha \Delta T / H$  для средней по слою частоты Брента – Вайсяля  $N$  выражение для  $\tau$  можно также представить в

виде:  $\tau \sim \frac{c\rho}{\eta \alpha g W_0} H^2 N^2$ . Оба варианта формул для величины  $\tau$  представляют явную зависимость  $\tau$  от основных параметров  $H$  и  $\Delta T$  (или  $N^2$ ).

При этом, например, возможность отнесения водоема к классу перемешивания continuous (перемешиваемые ежедневно) будет определяться лишь тем, как соотносится рассчитанная по приведенной формуле величина  $\tau$  с длительностью эпизодов ночного выхолаживания

(при условии, что известен суммарный поверхностный поток тепла  $W_0$ ). При этом, на первый взгляд, указанная явная зависимость (например,  $\tau \sim H$ ) согласуется с интуитивными и физически содержательными представлениями. Однако справедливость таких выводов и связанные с ними простые количественные оценки возможны лишь в случае, когда эффективность перемешивания  $\eta$  представляет собой постоянную величину.

Более адекватные выводы можно получить, конкретизируя диапазон возможных значений эффективности  $\eta$  и ее предположительную зависимость от  $H$ ,  $N$  и других параметров. Именно в этой связи величина  $\eta$  находится в фокусе исследований в данной статье.

В заключение раздела следует отметить, что при рассмотрении поверхностного выхолаживания основное внимание было уделено ночным эпизодам. При этом для выделения эпизодов возможно использование нескольких критериев. Простейший из них определяет эпизоды перемешивания как интервалы времени, когда отсутствует коротковолновая радиация [Solcerova et al., 2019]. В рамках альтернативного варианта, использованного в данной работе, эпизоды перемешивания отождествлялись с интервалами времени, в течение которых изменялись средняя по столбу воды температура или ВРЕ. Этот альтернативный вариант представляется более предпочтительным, с учетом достаточно большой тепловой инерции системы, запаздывания ее отклика на внешнее воздействие; характерное время  $\tau \sim h_{mix}/w^*$  такой тепловой релаксации с учетом полученной в [Богданов и др., 2023] оценки  $w^* \sim 10^{-3}$  м/с составляет 1 час и более.

## Результаты

Динамика температуры на разных глубинах за первый месяц наблюдений в 2021 и 2023 гг. представлена на рис. 1 соответствующими семействами линий. На обоих семействах хорошо прослеживаются основные особенности изменений температуры: суточная периодичность в поверхностном слое и синоптическая изменчивость с характерными интервалами 7–12 дней. В циклах дневного нагрева и ночного выхолаживания амплитуда колебаний температуры в верхних слоях водной толщи достигает нескольких градусов. При этом понижение средней по слою температуры в ночное время составляет несколько десятых градуса (рис. 2, а), что согласуется с оценками по формуле (3) при характерных значениях теплового

потока  $W_0$  в несколько десятков Вт/м<sup>2</sup> [Solcerova et al., 2019; Guseva et al., 2021].

На рис. 2, а, представлены также результаты расчета ВРЕ, осуществленного по формуле (4). Принципиально важный момент заключается в том, что интервалы времени, когда наблюдался локальный прирост  $E_b$ , практически совпадали с периодами понижения средней по столбу температуры. Эту особенность совместной динамики средней температуры и базовой потенциальной энергии подчеркивает рис. 2, б, на котором представлены отклонения обеих величин от скользящего 2-часового среднего; эти отклонения происходят практически в противофазе.

Как с физической точки зрения, так и для проведения дальнейших расчетов указанный факт важен тем, что доказывает возможность использования  $E_b$  и как прямого индикатора перемешивания, и как количественного параметра для энергетической оценки процесса перемешивания [Winters et al., 1995].

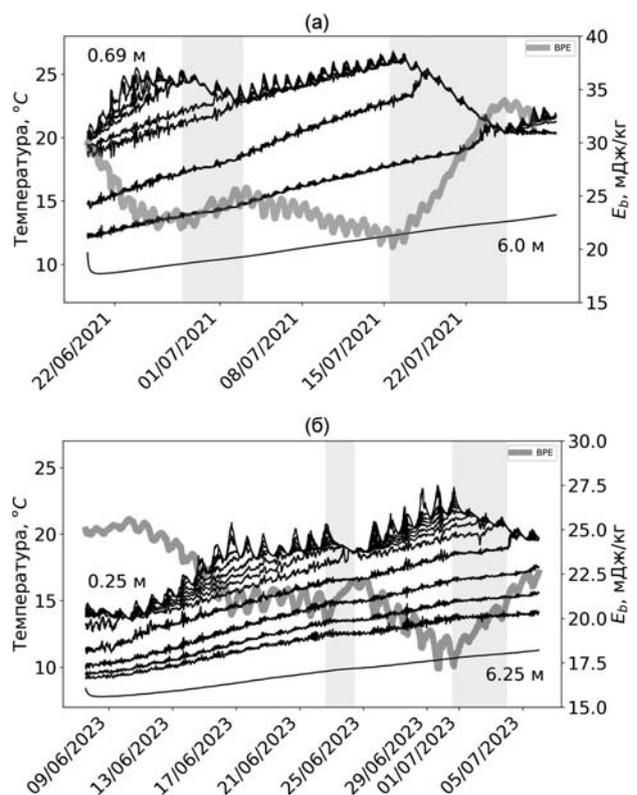


Рис. 1. Изменение температуры и ВРЕ на разных глубинах в 2021 (а) и 2023 (б) годах. Затененные полосы соответствуют интервалам синоптического роста ВРЕ

Fig. 1. Changes in water temperature and BPE at different depths in 2021 (a) and 2023 (б). The shaded areas correspond to the intervals of synoptic growth of BPE

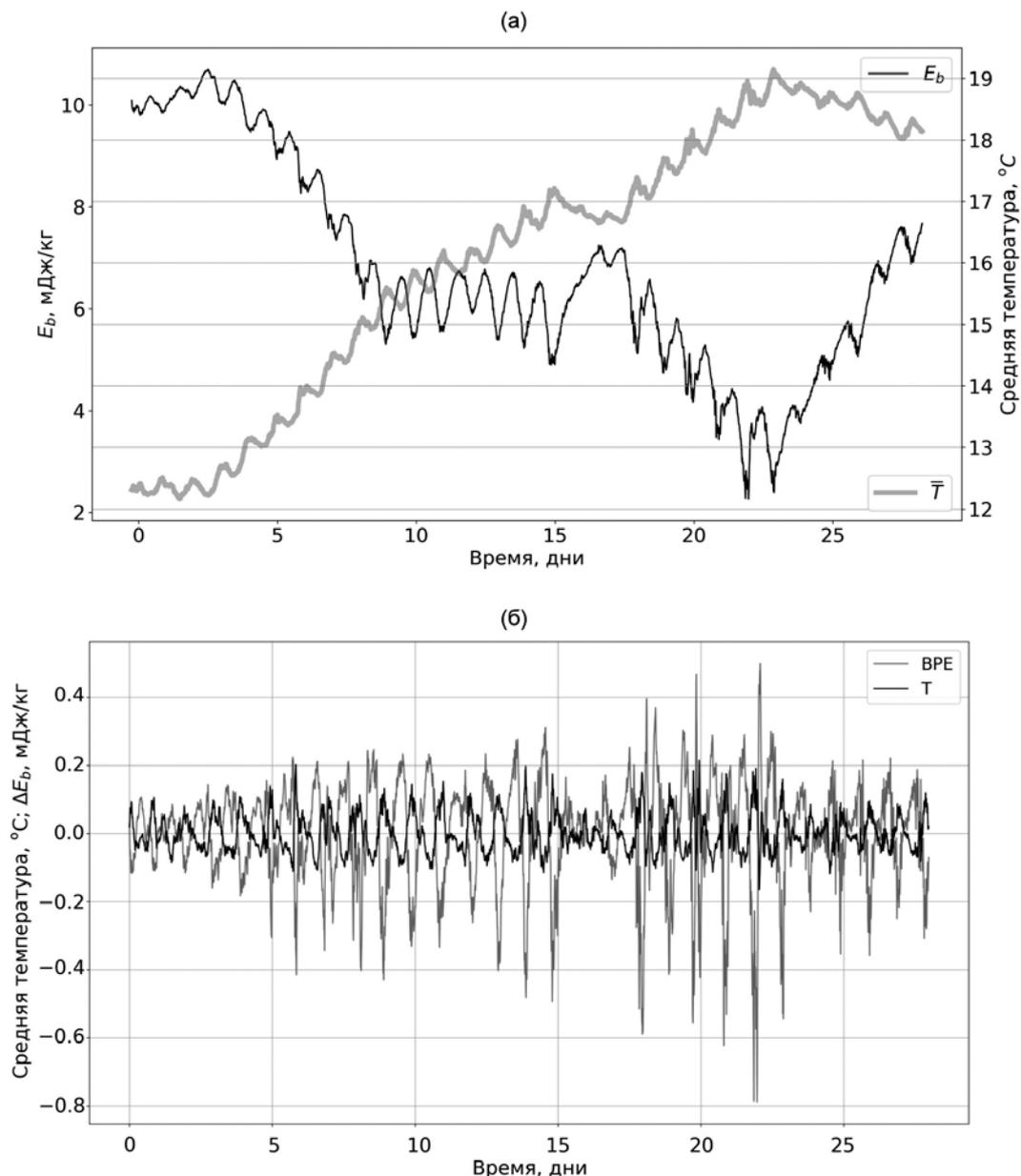


Рис. 2. Динамика ВРЕ и средней по столбу температуры, сезон 2023 г., отсчет дней – от 07.06.2023 (а); вариации (отклонение от 2-часового скользящего среднего) указанных величин в период с 20.06.2023 (б)

Fig. 2. Dynamics of base potential energy and column-average temperature, season 2023, counting days from 06.07.2023 (a); variations (deviation from the 2-hour moving average) of the indicated values in the period from June 20, 2023 (б)

Противофазный характер динамики средней по столбу температуры и ВРЕ характерен и для синоптических (с масштабом около недели) изменений, что наглядно демонстрируют рис. 1 и 2, б. При этом, однако, расчет энергетических параметров и эффективности перемешивания в течение нескольких дней или недель осложняется, например, необходимостью учета ре-стратификации в дневное вре-

мя, а также вариациями толщины перемешанного слоя.

В этой связи при проведении расчетов эффективности основной акцент был сделан на ночном выхолаживании; при этом эпизод перемешивания определялся как интервал времени, в течение которого происходило уменьшение средней по слою температуры и, соответственно, рост величины  $E_b$ .

Для некоторых ночных интервалов высокочастотные вариации  $E_b$  были весьма существенны, так что в окончательной версии эпизод определялся по характеру изменений осредненной по 2-часовому интервалу величины  $E_b$ . Количество таких эпизодов для сезонов 2021 и 2023 гг. составило соответственно 32 и 100.

Для каждого выделенного эпизода при расчете эффективности перемешивания по формуле (1) необходимо определить второй энергетический параметр: количество диссипированной в течение этого эпизода энергии  $\Delta E$ . В общем случае эта задача весьма сложна, диссипация зависит от параметров турбулентности в водной толще и их распределения по глубине. Косвенно эти особенности проявляются в специфике вертикального температурного профиля.

Вид профилей температуры и плотности, а также их характерная динамика иллюстрируются рис. 3. Для определенности представлено семейство профилей для первого месяца наблюдений в сезоне 2023 г. Многие мгновенные профили характеризуются достаточно сложной ступенчатой структурой, которая, предположительно, отражает тепловую предысторию [Folkard, 2021]. В целом, однако, для большинства профилей характерная особенность заключается в существовании хорошо перемешанного слоя толщиной  $h_{mix}$ , примыкающего к поверхности; ниже располагается стратифицированный слой. В связи с этим в дальнейшем при проведении расчетов для всех профилей использовалось указанное двухслойное автомодельное представление. Соответственно, вычисления проводились по формуле (5), с последующим

интегрированием скорости генерации  $J_{TKE}$  кинетической энергии по всему интервалу времени, связанному с конкретным эпизодом. Величина  $h_{mix}$ , представленная в формуле (5), для каждого момента времени рассчитывалась по методу наименьших квадратов; соответствующий алгоритм представлен в Приложении.

Результаты расчетов эффективности перемешивания представлены на рис. 4. Значения  $\eta$  для разных эпизодов варьировались в достаточно широких пределах (рис. 4, а), при этом дисперсия во многом связана со значительной погрешностью определения толщины перемешанного слоя.

При анализе результатов особого внимания заслуживают два момента. Во-первых, средние по всем эпизодам значения  $\eta$  составили соответственно 0,45 и 0,49 для 2021 и 2023 гг. Оба эти значения существенно превышают наиболее общепринятую оценку 0,17 [Wunsch, Ferrari, 2004; Maffioli et al., 2016; Ulloa et al., 2018]. Кроме того, обнаружено, что значение эффективности варьируется в течение сезона в зависимости от толщины перемешанного слоя. Характер корреляции величин  $\eta$  и  $h_{mix}$  иллюстрирует рис. 4, б: с увеличением  $h_{mix}$  величина  $\eta$  уменьшается. О возможном влиянии температурного профиля на эффективность ночного перемешивания указывалось ранее в работе [Solcerova et al., 2019].

## Дискуссия и заключение

Вопрос об универсальности численного значения (предположительно 0,17) эффективности перемешивания остается одним из самых актуальных при изучении режимов перемешивания.

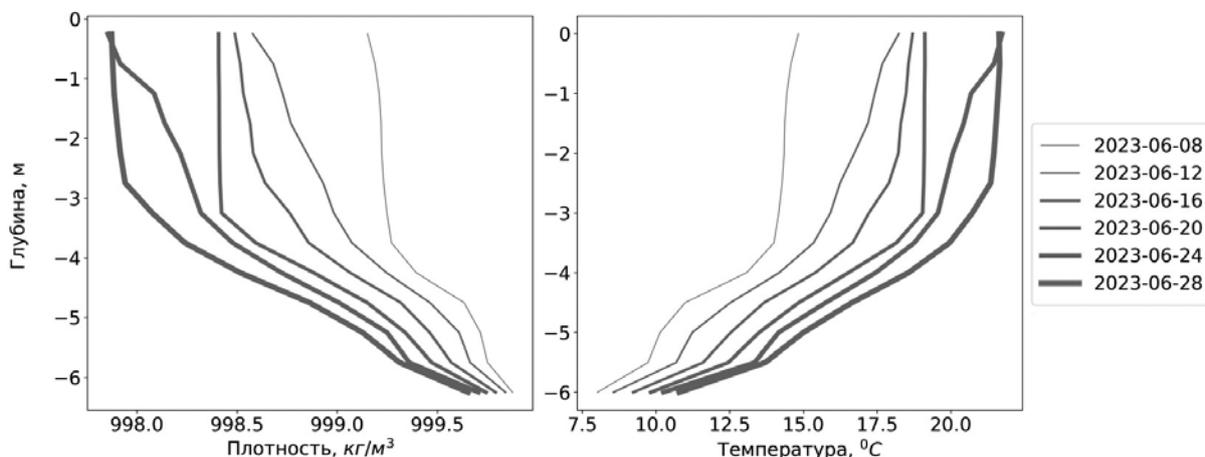


Рис. 3. Динамика полуденных вертикальных профилей плотности и температуры с 8 по 28 июня 2023 г.

Fig. 3. Dynamics of midday vertical profiles of density and temperature from June 8 to June 28, 2023

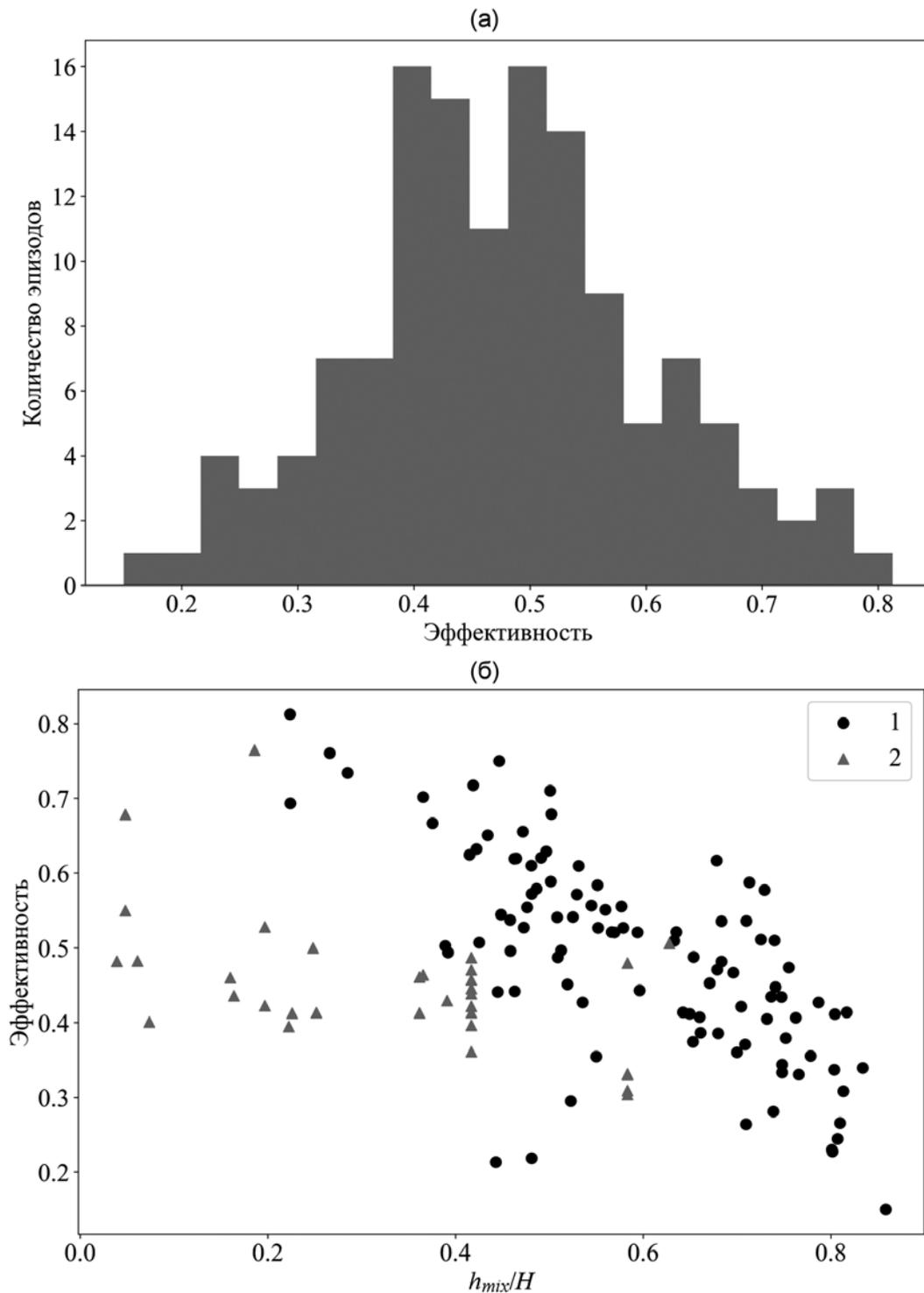


Рис. 4. Гистограмма значений эффективности перемешивания по расчетам для 132 эпизодов (а); эффективность перемешивания водной толщи Голубой ламбы в период открытой воды в зависимости от толщины перемешанного слоя ( $h_{mix}$  – толщина перемешанного слоя,  $H$  – общая глубина станции, 1 – 2023 г., 2 – 2021 г. Каждая точка соответствует эпизоду ночного перемешивания) (б)

Fig. 4. Histogram of mixing efficiency values based on calculations for 132 episodes (a). The efficiency of mixing of the water column of Blue Lamba (Lake) during the period of open water depending on the thickness of the mixed layer ( $h_{mix}$  is the thickness of the mixed layer,  $H$  is the total depth of the station, 1 – 2023, 2 – 2021. Each point corresponds to an episode of overnight mixing) (б)

Полученные в данной работе аномально высокие значения  $\eta$  для перемешивания при ночном выхолаживании согласуются с оценками, приведенными ранее в работе [Богданов и др., 2023], а также с результатами расчетов перемешивания в период весенней подледной конвекции [Ulloa et al., 2018]. В этой связи в контексте проблемы универсальности нельзя исключить, что одним из факторов, обуславливающих вариативность  $\eta$ , является механизм накачки. И отсюда можно сделать предварительный вывод о большем значении  $\eta$  в случае радиационного (buoyancy driven) механизма по сравнению с механизмом механической (ветровой) накачки. Для проверки такого предположения требуется проведение более комплексных и точных экспериментов, позволяющих детальнее изучить динамику энергетических параметров в процессе перемешивания. Такой анализ возможен при существенном уменьшении дискретности измерений по вертикали; в экспериментальный комплекс необходимо также включать приборы (например, акустические профилографы), позволяющие провести независимую оценку диссипации.

В работе также установлено, что значение  $\eta$  существенно зависит от формы вертикального профиля плотности непосредственно перед началом эпизода перемешивания. В рамках предположения об автомодельности профиля эта зависимость проявлялась в существовании корреляции между значением эффективности и толщиной КПС. На возможную роль формы профиля как фактора, обуславливающего вариативность  $\eta$ , указывалось ранее в ряде работ, причем в разных контекстах. В работе [Solcero et al., 2019] подобная вариативность величины  $\eta$  рассматривается как результат тепловой инерции водоема. Вопрос о форме профиля как факторе, значимом для  $\eta$ , имеет еще один аспект, связанный с необходимостью разделения водной толщи на активные и пассивные зоны. Как указано в [Brainerd, Gregg, 1995], следует различать перемешанные (mixed) и перемешиваемые (mixing) слои. К последним относятся зоны, в которых происходит активное перемешивание, сопряженное с турбулентным движением жидкости. Перемешанные же (mixed) слои обычно ассоциируются с однородными по температуре участками водного столба, в которых движение жидкости может отсутствовать, а однородность является результатом предшествующих процессов активного перемешивания. Идентификация указанных слоев и их роль в процессе перемешивания более подробно рассмотрены в работе [Davies Wykes et al., 2015]. Показано, что в случае неу-

стойчивых профилей могут существовать слои (remote zones), удаленные от зоны активного перемешивания, однако дающие вклад в доступную потенциальную энергию (рис. 5).

По завершении эпизода перемешивания профиль в этих зонах и, соответственно, потенциальная энергия не изменяются. В некотором смысле происходит прямая (не сопровождаемая диссипацией) трансформация связанной с этими слоями АРЕ непосредственно в базовую потенциальную. Как следствие, эффективность перемешивания оказывается чувствительной по отношению к наличию и протяженности таких удаленных зон.

В целом можно предположить, что в общем случае значение эффективности зависит не только от механизма накачки и параметров турбулентности, но также от начального вида

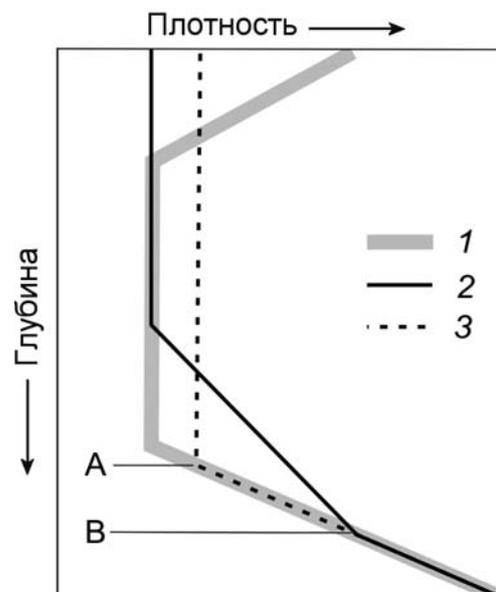


Рис. 5. Схематическое представление профилей плотности в начале (1) и в конце (3) эпизода перемешивания, а также вид начального профиля после адиабатного перераспределения слоев по вертикали в монотонном по плотности порядке (2). Толща воды между глубинами А и В представляет собой пример удаленного от зоны перемешивания слоя, влияющего, однако, на значение эффективности  $\eta$

Fig. 5. Schematic representation of the density profiles at the beginning (1) and end (3) of the mixing episode, as well as the appearance of the initial profile after adiabatic redistribution of layers vertically in a density-monotonic order (2). The water column between depths A and B is an example of a layer remote from the mixing zone, which, however, affects the value of efficiency  $\eta$

профиля. И в этом отношении использованный для расчета эффективности интегральный энергетический метод является на данный момент наиболее предпочтительным. Во всяком случае, даже постановка и тем более решение основных проблем, затронутых в обсуждении, выходят за рамки локальных (в пространстве и времени) методов расчета.

### Приложение. Расчет толщины перемешанного слоя

Толщина перемешанного слоя определяется по методу наименьших квадратов в рамках предположения об автомодельности вертикального профиля температуры. При этом предполагалось, что водная толща представлена двумя слоями: перемешанным верхним, примыкающим к поверхности озера, и придонным стратифицированным. Температура на дне  $T_b$  считалась заданной, и в рамках принятого предположения о структуре автомодельного профиля глубина  $h$  перемешанного слоя остается единственным свободным параметром. При этом из семейства автомодельных профилей с разными значениями  $h$  выбирается тот, относительно которого разброс опытных данных минимален. Значение  $h$  для этого профиля отождествляется с толщиной  $h_{mix}$  КПС. Подобный метод был ранее использован в [Klaić et al., 2020] для определения глубины термоклина при использовании 2-слойной ступенчатой модели профиля.

Обозначим за  $z_i$  и  $h_i$  глубину и толщину слоя, связанного с  $i$ -м датчиком, за  $T_i$  – показания датчиков в данный момент времени;  $n$  – общее число датчиков. Чтобы по заданным  $T_i$  и  $h_i$  найти толщину перемешанного слоя, для каждого значения параметра  $h$  из диапазона  $(0, H)$  выполняются следующие действия и расчеты:

– определяется номер  $i^*$  последнего датчика, глубина которого меньше  $h$  (нумерация датчиков – от поверхности);

– по формуле  $\bar{T}(h) = \sum_{i=1}^{i^*} T_i \frac{h_i}{h}$  рассчитывается средняя температура в слое толщиной  $h$ ;

– по известным величинам  $h$ ,  $T_b$  и  $\bar{T}(h)$  производится построение автомодельного профиля принятого вида:

$$T(z) = \begin{cases} \bar{T}(h), & z < h \\ T_b + \frac{T_b - \bar{T}(h)}{H-h}(z - H), & z \geq h \end{cases};$$

– рассчитываются квадратичные отклонения  $D(h)$  экспериментальных данных от функции  $T(z)$ :

$$D(h) = \sum_{i=1}^{i^*} (T_i - \bar{T}(h))^2 h_i / h + \sum_{i=i^*+1}^n (T_i - T(z_i))^2 h_i / h.$$

Значение  $h$ , при котором величина  $D(h)$  принимает минимальное значение, отождествляется с толщиной КПС.

На рис. 6 представлены результаты расчета толщины КПС для сезона 2023 г., а также приведена кривая, характеризующая эволюцию температуры верхнего слоя воды (по показаниям ближайшего к поверхности температурного датчика).

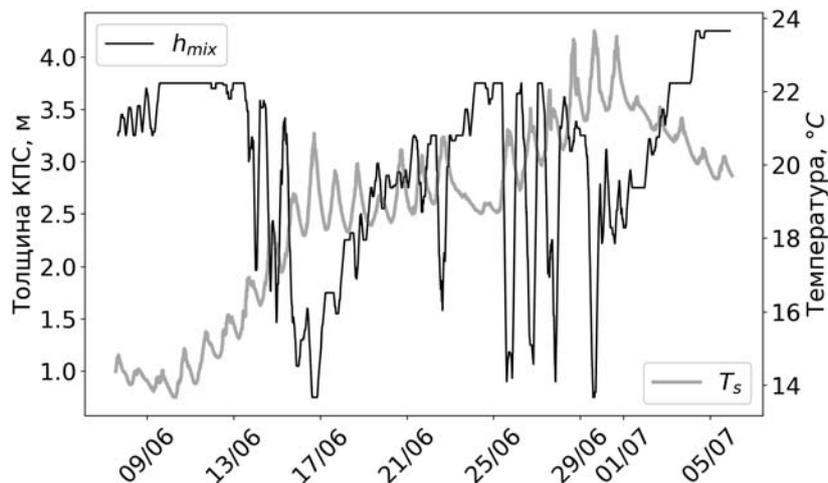


Рис. 6. Результаты расчета толщины  $h_{mix}$  КПС в течение первого месяца наблюдений в 2023 г. Вторая кривая представляет эволюцию температуры верхнего слоя воды

Fig. 6. Results of calculating the thickness  $h_{mix}$  of the CML during the first month of observations in 2023. The second curve represents the evolution of the temperature of the surface layer of water

## Литература

Богданов С. Р., Пальшин Н. И., Здоровеннов Р. Э., Митрохов А. В., Кузнецов П. С., Новикова Ю. С., Здоровеннова Г. Э. Оценка эффективности перемешивания небольшого димиктического озера при поверхностном выхолаживании // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 2. С. 73–88. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(2)-6

Bluteau C. E., Jones N. L., Ivey G. N. Turbulent mixing efficiency at an energetic ocean site // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013. Vol. 118, no. 9. P. 4662–4672.

Brainerd K. E., Gregg M. C. Surface mixed and mixing layer depths // *Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers*. 1995. Vol. 42, no. 9. P. 1521–1543. doi: 10.1016/0967-0637(95)00068-H

Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019. Vol. 51(1). P. 189–215. doi: 10.1146/annurev-fluid-010518-040506

Chen C.-T. A., Millero F. J. Thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range // *Limnol. Oceanogr.* 1986. Vol. 31, no. 3. P. 657–662. doi: 10.4319/lo.1986.31.3.0657

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. Vol. 10. P. 172–185. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

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

Deardorff J. W. Preliminary results from numerical integrations of the unstable planetary boundary layer // *J. Atmos. Sci.* 1970. Vol. 27. P. 1209–1211. doi: 10.1175/1520-0469(1970)027<1209:PRFNIO>2.0.CO;2

Doda T., Ramon C. L., Ulloa H. N., Brendwald M. S., Kipfer R., Perga M.-E., Wüest A., Schubert C. J., Bouffard D. Lake surface cooling drives littoral-pelagic exchange of dissolved gases // *Sci. Adv.* 2024. Vol. 10, no. 4. Art. 0617. doi: 10.1126/sciadv.adi0617

Folkard A. The multi-scale layering-structure of thermal microscale profiles // *Water*. 2021. Vol. 13. Art. 3042. doi: 10.3390/w13213042

Gregg M. C., D'Asaro E. A., Riley J. J., Kunze E. Mixing efficiency in the ocean // *Ann. Rev. Marine Sci.* 2018. Vol. 10, no. 1. P. 443–473. doi: 10.1146/annurev-marine-121916-063643

Guseva S., Casper P., Sachs T., Spank U., Lorke A. Energy flux paths in lakes and reservoirs // *Water*. 2021. Vol. 13. Art. 3270. doi: 10.3390/w13223270

Holgerson M. A., Richardson D. C., Roith J., Bortolotti L. E., Finlay K., Hornbach D. J., Gurung K., Ness A., Andersen M. R., Bansal S., Finlay J. C., Cianci-Gaskill J. A., Hahn S., Janke B. D., McDonald C., Mesman J. P., North R. L., Roberts C. O., Sweetman J. N., Webb J. R. Classifying mixing regimes in ponds and shallow lakes // *Water Resources Res.* 2022. Vol. 58. e2022WR032522. doi: 10.1029/2022WR032522

Jonas T., Terzhevik A. Y., Mironov D. V., Wüest A. Radiatively driven convection in an ice-covered lake

investigated by using temperature microstructure technique // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, no. C6. P. 3183. doi: 10.1029/2002JC001316

Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 161. P. 179–190.

Klaić Z. B., Babić K., Orlić M. Evolution and dynamics of the vertical temperature profile in an oligotrophic lake // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020. Vol. 24. P. 3399–3416. doi: 10.5194/hess-24-3399-2020

Maffioli A., Brethouwer G., Lindborg E. Mixing efficiency in stratified turbulence // *J. Fluid Mech.* 2016. Vol. 794. R3. doi: 10.1017/jfm.2016.206

Read J. S., Hamilton D. P., Desai A. R., Rose K. C., MacIntyre S., Lenters J. D., Smyth R. L., Hanson P. C., Cole J. J., Staehr P. A., Rusak J. A., Pierson D. C., Brookes J. D., Laas A., Wu C. H. Lake-size dependency of wind shear and convection as controls on gas exchange // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. L09405. doi: 10.1029/2012GL051886

Negandhi K., Laurion I., Whiticar M. J., Galand P. E., Xu X., Lovejoy C. Small thaw ponds: An unaccounted source of methane in the Canadian High Arctic // *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8, no. 11. e78204. doi: 10.1371/journal.pone.0078204

Rehder Z., Kleinen T., Kutzbach L., Stepanenko V., Langer M., Brovkin V. Simulated methane emissions from Arctic ponds are highly sensitive to warming // *Biogeosciences*. 2023. Vol. 20, no. 14. P. 2837–2855. doi: 10.5194/bg-20-2837-2023

Solcerova A., van de Ven F., van de Giesen N. Night-time cooling of an urban pond // *Front. Earth Sci.* 2019. Vol. 7, no. 156. P. 1–10. doi: 10.3389/feart.2019.00156

Ulloa H. N., Wüest A., Bouffard D. Mechanical energy budget and mixing efficiency for a radiatively heated ice-covered waterbody // *J. Fluid Mech.* 2018. Vol. 852. R1. doi: 10.1017/jfm.2018.587

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

Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2004. Vol. 36, no. 1. P. 281–314.

## References

Bogdanov S. R., Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Mitrokhov A. V., Kuznetsov P. S., Novikova J. S., Zdorovennova G. E. Estimation of mixing efficiency of a small dimictic lake due to surface cooling. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023;16(2):73–88. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(2)-6 (In Russ.)

Bluteau C. E., Jones N. L., Ivey G. N. Turbulent mixing efficiency at an energetic ocean site. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013;118(9):4662–4672.

Brainerd K. E., Gregg M. C. Surface mixed and mixing layer depths. *Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers*. 1995;42(9):1521–1543. doi: 10.1016/0967-0637(95)00068-H

Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019;51(1):189–215. doi: 10.1146/annurev-fluid-010518-040506

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

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;10:172–185. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

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

Deardorff J. W. Preliminary results from numerical integrations of the unstable planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.* 1970;27:1209–1211. doi: 10.1175/1520-0469(1970)027<1209:PRFNIO>2.0.CO;2

Doda T., Ramon C. L., Ulloa H. N., Brendwald M. S., Kipfer R., Perga M.-E., Wüest A., Schubert C. J., Bouffard D. Lake surface cooling drives littoral-pelagic exchange of dissolved gases. *Sci. Adv.* 2024;10(4). doi: 10.1126/sciadv.adi0617

Folkard A. The multi-scale layering-structure of thermal microscale profiles. *Water.* 2021;13:3042. doi: 10.3390/w13213042

Gregg M. C., D'Asaro E. A., Riley J. J., Kunze E. Mixing efficiency in the ocean. *Ann. Rev. Marine Sci.* 2018;10(1):443–473. doi: 10.1146/annurev-marine-121916-063643

Guseva S., Casper P., Sachs T., Spank U., Lorke A. Energy flux paths in lakes and reservoirs. *Water.* 2021;13:3270. doi: 10.3390/w13223270

Holgerson M. A., Richardson D. C., Roith J., Bortolotti L. E., Finlay K., Hornbach D. J., Gurung K., Ness A., Andersen M. R., Bansal S., Finlay J. C., Cianci-Gaskill J. A., Hahn S., Janke B. D., McDonald C., Mesman J. P., North R. L., Roberts C. O., Sweetman J. N., Webb J. R. Classifying mixing regimes in ponds and shallow lakes. *Water Resources Res.* 2022;58. e2022WR032522. doi: 10.1029/2022WR032522

Jonas T., Terzhevik A. Y., Mironov D. V., Wüest A. Radiatively driven convection in an ice-covered lake investigated by using temperature microstructure

technique. *J. Geophys. Res.* 2003;108(6):3183. doi: 10.1029/2002JC001316

Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes. *Earth-Science Reviews.* 2016;161:179–190.

Klaić Z. B., Babić K., Orlić M. Evolution and dynamics of the vertical temperature profile in an oligotrophic lake. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020;24:3399–3416. doi: 10.5194/hess-24-3399-2020

Maffioli A., Brethouwer G., Lindborg E. Mixing efficiency in stratified turbulence. *J. Fluid Mech.* 2016;794:R3. doi: 10.1017/jfm.2016.206

Read J. S., Hamilton D. P., Desai A. R., Rose K. C., MacIntyre S., Lenters J. D., Smyth R. L., Hanson P. C., Cole J. J., Staehr P. A., Rusak J. A., Pierson D. C., Brookes J. D., Laas A., Wu C. H. Lake-size dependency of wind shear and convection as controls on gas exchange. *Geophys. Res. Lett.* 2012;39:L09405. doi: 10.1029/2012GL051886

Negandhi K., Laurion I., Whiticar M. J., Galand P. E., Xu X., Lovejoy C. Small thaw ponds: An unaccounted source of methane in the Canadian High Arctic. *PLoS ONE.* 2013;8(11):e78204. doi: 10.1371/journal.pone.0078204

Rehder Z., Kleinen T., Kutzbach L., Stepanenko V., Langer M., Brovkin V. Simulated methane emissions from Arctic ponds are highly sensitive to warming. *Biogeosciences.* 2023;20(14):2837–2855. doi: 10.5194/bg-20-2837-2023

Solcerova A., van de Ven F., van de Giesen N. Nighttime cooling of an urban pond. *Front. Earth Sci.* 2019;7(156):1–10. doi: 10.3389/feart.2019.00156

Ulloa H. N., Wüest A., Bouffard D. Mechanical energy budget and mixing efficiency for a radiatively heated ice-covered waterbody. *J. Fluid Mech.* 2018;852:R1. doi: 10.1017/jfm.2018.587

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

Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2004;36(1):281–314.

Поступила в редакцию / received: 31.01.2024; принята к публикации / accepted: 09.02.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Богданов Сергей Рэмович

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

e-mail: [Sergey.R.Bogdanov@mail.ru](mailto:Sergey.R.Bogdanov@mail.ru)

### Здоровеннова Галина Эдуардовна

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

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

### Здоровеннов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

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

## CONTRIBUTORS:

### Bogdanov, Sergey

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

### Zdorovennova, Galina

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

### Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

**Максимов Игорь Александрович**

аспирант

*e-mail: maksimovia98@gmail.com*

**Пальшин Николай Иннокентьевич**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: npalshin@mail.ru*

**Maksimov, Igor**

Postgraduate Student

**Palshin, Nikolay**

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

УДК 57.014 : 502.4

## ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Е. Н. Унковская<sup>1\*</sup>, М. В. Косова<sup>2,3</sup>, Н. В. Шурмина<sup>2</sup>,  
Ф. М. Мухаметзянова<sup>2</sup>, Ю. А. Игнатъев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник (ул. Вехова, 1, пос. Садовый, Зеленодольский район, Республика Татарстан, Россия, 422537), \*I-unka@mail.ru

<sup>2</sup> Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420087)

<sup>3</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет (ул. Кремлевская, 18, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420008)

В статье обсуждаются результаты гидрохимического исследования разнотипных озер Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны (Республика Татарстан), выполненного в 2021–2023 гг. Представлена пространственная изменчивость величины общей минерализации водоемов в бассейнах рек Сумка и Сер-Булак. Дана сравнительная характеристика газового режима, содержания органических (по величине БПК<sub>5</sub> и ХПК) и биогенных веществ в проточных и бессточных озерах, рассчитаны коэффициенты превышения предельно допустимых концентраций по всем показателям. На основе удельного комбинаторного индекса загрязненности воды оценена степень загрязнения озер.

Ключевые слова: Волжско-Камский заповедник; общая минерализация; превышение предельных концентраций; газовый режим; биогенные вещества

Для цитирования: Унковская Е. Н., Косова М. В., Шурмина Н. В., Мухаметзянова Ф. М., Игнатъев Ю. А. Гидрохимическая характеристика разнотипных озер Волжско-Камского заповедника // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 39–50. doi: 10.17076/lim1869

**E. N. Unkovskaya<sup>1\*</sup>, M. V. Kosova<sup>2,3</sup>, N. V. Shurmina<sup>2</sup>, F. M. Mukhametzyanova<sup>2</sup>,  
Yu. A. Ignatiev<sup>2</sup>. HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TYPES OF LAKES  
IN THE VOLZHSKO-KAMSKY RESERVE**

<sup>1</sup> Volzhsko-Kamsky State Nature Biosphere Reserve (1 Vekhova St., 422537 Sadovy vil., Zelenodolsky District, Republic of Tatarstan, Russia), \*I-unka@mail.ru

<sup>2</sup> Institute of Ecology and Subsoil Use, Tatarstan Academy of Sciences (28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)

<sup>3</sup> Kazan (Volga region) Federal University (18 Kremlyovskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)

The article discusses the results of hydrochemical study of different types of lakes in the Raifa cluster of the Volzhsko-Kamsky Nature Reserve and its buffer zone (Republic of Tatarstan), carried out in 2021–2023. The spatial variability of the total mineralization

of the water bodies in the basins of the Sumka and Ser-Bulak Rivers is presented. The article gives a comparative description of the gas regime, the content of organic substances (in terms of BOD<sub>5</sub> and COD) and nutrients in open and closed lakes, as well as the calculated coefficients of exceeding the maximum permissible concentrations for all indicators. The degree of the lakes pollution was assessed on the basis of the specific combinatorial index of water pollution.

**Keywords:** Volzhsko-Kamsky Reserve; general mineralization; exceeding maximum concentrations; gas regime; nutrients

For citation: *Unkovskaya E. N., Kosova M. V., Shurmina N. V., Mukhametzyanova F. M., Ignatiev Yu. A. Hydrochemical characteristics of different types of lakes in the Volzhsko-Kamsky Reserve. Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2024. No. 2. P. 39–50. doi: 10.17076/lim1869*

## Введение

Основной задачей особо охраняемых природных территорий (ООПТ) является сохранение и изучение естественного хода природных процессов. В современном мире наиболее сложно избежать загрязнения поверхностных и подземных вод в связи с многофункциональным воздействием на водные объекты. Проблема нарушения естественного режима водоемов и водотоков часто является актуальной и для ООПТ, в частности для Волжско-Камского заповедника. На территории Раифского участка заповедника (Зеленодольский район Республики Татарстан) и его охранной зоны, граничащей с землями сельскохозяйственного назначения и населенных пунктов, озера также испытывают различную антропогенную нагрузку, связанную прежде всего с поступлением загрязненного поверхностного стока в проточные водоемы из-за интенсивного развития эрозионных процессов на водосборе. Со стоком рек дополнительно привносятся и биогенные вещества, ускоряющие эвтрофирование.

Мониторинг химического состава поверхностных вод Раифского участка осуществляется с 1983 г. в рамках основной научной темы «Наблюдения явлений и процессов в природном комплексе заповедника и их изучение по программе «Летопись природы». Основные физико-химические показатели водоемов и водотоков опубликованы, рассмотрены и частные вопросы по гидрологическим и гидрохимическим особенностям рек, сезонным и межгодовым изменениям в ионном и биогенном составе разнотипных озер, гидрохимическом режиме за летний период в 2001–2015 гг. [Унковская и др., 2009, 2016]. В настоящей статье представлена сравнительная характеристика химического состава проточных и бессточных озер за 2021–2023 гг.

Целью данного исследования являлось уточнение химического состава основных разнотипных озер путем корректировки частоты отбора проб и оценка степени их загрязнения. Анализ полученных результатов выполнен в сравнении с ранее полученными данными за период 2008–2023 гг., рассмотрена многолетняя динамика содержания биогенных веществ, вносящих наибольший вклад в загрязнение озер.

## Материалы и методы

Особенностью Раифского участка заповедника является своеобразная гидрологическая система разнотипных озер, объединенных малыми реками Сумка и Сер-Булак. Водосборный бассейн р. Сумка и ее притока р. Сер-Булак является бассейном данного участка: р. Сумка протекает по открытым участкам (залесено только 46 % водосборного бассейна), бассейн р. Сер-Булак полностью покрыт лесом и частично болотами. Поэтому озера, расположенные в их долинах, по происхождению, физико-географическим и морфометрическим показателям значительно отличаются друг от друга. Первым по течению р. Сумка расположено оз. Бело-Безводное (местное название Белое), которое находится в охранной зоне заповедника около пос. Бело-Безводное; через 2,5 км, в месте слияния Сумки и Сер-Булака, расположено заповедное оз. Раифское; через 3 км, около с. Ильинка, Сумка протекает через оз. Ильинское. С долиной Сумки также связаны заповедное оз. Илантово и оз. Гнилое, связанное с предыдущим озером древней ложбиной стока, а также расположенные в охранной зоне озера Крутое и Шатуниха. Река Сер-Булак протекает через заповедное оз. Линево и оз. Карасиха, расположенное в пос. Садовый; в долине Сер-Булака также находятся заповедные озера Казанское и Круглое. С древней долиной Сер-Булака связано озеро-болото Долгое.

Для сравнительной характеристики мы условно разделили водоемы на группы: проточные озера карстово-суффузионного происхождения с максимальной глубиной ( $h_{\max}$ ) 4,0–20,3 м в долинах р. Сумка (озера Бело-Безводное (Белое), Раифское, Ильинское) и р. Сер-Булак – с  $h_{\max}$  5,4–10,0 м (озера Линево, Карасиха); бессточные озера суффузионного происхождения, расположенные около долин рек, с  $h_{\max}$  2,0–6,0 м (озера Илантово, Круглое, Моховое, Крутое, Шатуниха), и озера, расположенные в «окнах» торфяных болот, с  $h_{\max}$  5,4–12,5 м (озера Гнилое, Долгое). Отдельно исследовался бобровый пруд, образованный в 1996 г. после интродукции бобра европейского (*Castor fiber*), с  $h_{\max}$  1,5 м (оз. Торфяное).

Пробы воды отбирались на сети контрольных станций (рис. 1) в период открытой воды в 2021–2023 гг. с разной периодичностью. В проточных озерах и близ расположенных бессточных озер – с мая по сентябрь ежемесячно, в удаленных озерах («окнах» болот) – один раз в летний период. Отбор проводился в поверхностном и придонном горизонтах, в мелководных озерах (Шатуниха, Крутое и Торфяное) – в прибрежной зоне. Всего обработано 162 пробы на 24 показателя, при отборе гидрохимических проб фиксировались физические показатели воды: прозрачность (по диску Секки), цвет (по шкале цвета ГОСТ 4266-79),

температура через каждые 2 м (термометром на батометре Молчанова). Аналитическое определение содержания тяжелых металлов (меди, никеля, свинца, цинка, марганца) выполнялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии; определение концентрации аммоний-иона, нитрит-иона, нитрат-иона, фосфат-иона, сульфат-иона, железа общего, сероводорода и сульфидов, АСПАВ проводилось методом спектрофотометрии. Методом газожидкостной хроматографии определялись фенолы; титриметрическим методом – содержание растворенного кислорода, биохимического и химического потребления кислорода, гидрокарбонатов, общей жесткости и кальция; расчетным способом – магния и суммы натрия и калия. Анализ выполнялся по аттестованным методикам. Сравнение химических показателей проводилось в соответствии с предельно допустимыми концентрациями для рыбохозяйственных водоемов [Приказ..., 2016]. Тип воды определялся по шкале О. А. Алекина [1970]. Оценка качества воды осуществлялась согласно методу комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям [РД 52.24.643-2002] с расчетом удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). Расчет проводился по обязательному перечню 15 загрязняющих веществ с включением трех специфических показателей,

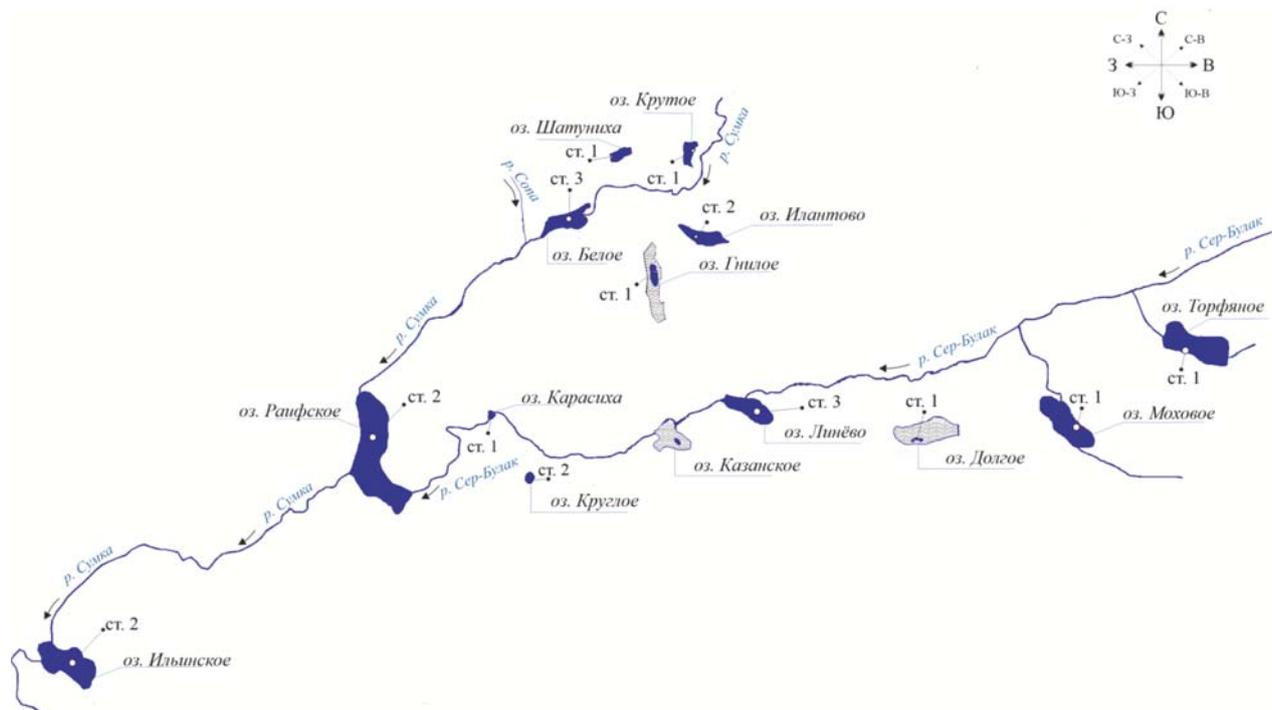


Рис. 1. Схема расположения станций отбора гидрохимических проб

Fig. 1. Layout of the hydrochemical sampling stations

имеющих локальное значение в исследуемых водоемах вследствие часто фиксируемых превышений ПДК р. х. (рН, фосфат-ион, сероводород и сульфиды).

## Результаты и обсуждение

Физические показатели – прозрачность, цвет и температура воды изучаемых водоемов изменялись за период исследований в широком диапазоне. В проточных озерах р. Сумка прозрачность воды изменялась от 0,6 м в оз. Белое до 1,7–2,0 м в оз. Раифское, цвет воды соответствовал зеленовато-желтому, температурный режим был характерен для глубоководных стратифицированных озер. Проточные озера р. Сер-Булак и «окна» в сплаvine торфяных болот отличались низкой прозрачностью воды – 0,3–0,6 м при коричневом цвете воды и выраженным термоклинном на глубине 0,5–1,5 м. Бессточные озера и бобровый пруд характеризовались прозрачностью 0,5–0,9 м при зеленовато-желтом или желтом, редко коричневом цвете воды (озера Моховое, Илантово), с равномерным понижением температуры по всей толще воды.

Тип воды исследованных водоемов, по классификации О. А. Алекина [1970], относился к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе. Сумма главных ионов ( $\Sigma_{\text{и}}$ , общая минерализация) изменялась в период исследований от 82,2–87,3 мг/дм<sup>3</sup> в «окнах» болот и заболочивающихся озерах до 222,5–329,9 мг/дм<sup>3</sup> в проточных водоемах р. Сумка. Это связано с тем, что в верховье, расположенном на склоне коренного берега волжской долины, р. Сумка имеет грунтовое питание и, как следствие, высокие значения минерализации – до 775,6 мг/дм<sup>3</sup> [Унковская и др., 2016]. Формирование ионного состава здесь осуществляется за счет поступления карбонатных соединений из родников, наполняющих речной сток, и дополнительно сточных вод с высоким содержанием сульфатов, поступающих из подземных источников [Тайсин, 2006; Унковская и др., 2016]. Поэтому первое по течению реки оз. Бело-Безводное (Белое) характеризовалось самой высокой минерализацией – 327,4 мг/дм<sup>3</sup>, со среднегодовым содержанием гидрокарбонатов 216,4 мг/дм<sup>3</sup>, сульфатов – 9,9 мг/дм<sup>3</sup>, хлоридов – 20,3 мг/дм<sup>3</sup>, кальция – 53,2 мг/дм<sup>3</sup>. Для рек Сумка и Сер-Булак в среднем и нижнем течении характерно атмосферное питание, что определяет невысокие величины минерализации озер в их долинах. Расположенные ниже по течению р. Сумка озера испытывают разбавление: среднегодовые значения минерализации здесь снижаются до 228,5 мг/дм<sup>3</sup> (оз. Раифское)

и 145,1 мг/дм<sup>3</sup> (оз. Ильинское). В проточных озерах р. Сер-Булак сумма главных ионов не превышала 78,9–84,3 мг/дм<sup>3</sup>, в бессточных – изменялась в широком диапазоне от 51,4 до 196,9 мг/дм<sup>3</sup>. Бобровый пруд характеризовался минерализацией, равной 76,9 мг/дм<sup>3</sup>. Соотношение главных ионов также изменялось по группам озер, максимальные значения концентрации отдельных ионов отмечались в придонных слоях. Средние концентрации гидрокарбонатов составляли для проточных озер в долине р. Сумка 77,7–218,1 мг/дм<sup>3</sup>, в долине р. Сер-Булак – 45,5–50,6 мг/дм<sup>3</sup>, для бессточных озер – 24,1–126,0 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрации сульфатов имели меньший размах – 6,3–11,2 мг/дм<sup>3</sup>, хлориды – 5,3–30,7 мг/дм<sup>3</sup> для всех водоемов. Такое же распределение было характерно и для катионов: средние концентрации кальция уменьшались от 10,4–50,9 мг/дм<sup>3</sup> в проточных озерах до 4,9–33,7 мг/дм<sup>3</sup> в бессточных, концентрация магния колебалась неравномерно в пределах 1,7–14,8 мг/дм<sup>3</sup>. Такие же пропорции сохранялись и в эквивалентном соотношении (рис. 2). Ионный состав исследуемых озер в 2021–2023 гг. и формула Курлова, выражающая эквивалентное соотношение анионов и катионов, представлены в табл. 1.

Водородный показатель изменялся в широком диапазоне в зависимости от типа озера, сезона года, горизонта и составлял 5,9–9,8 ед. рН. Для проточных озер в долине р. Сумка была характерна нейтральная или слабощелочная реакция среды (7,4–8,7 ед. рН), за исключением оз. Ильинское, в воде которого в июле–августе часто отмечались значения до 9,8 ед. рН (до 1,2 ПДК р. х.) в связи с развитием синезеленых водорослей. В озерах, расположенных в долине р. Сер-Булак, и большинстве бессточных озер водородный показатель изменялся в пределах 6,2–8,2 ед. рН с постепенным снижением в придонных слоях до 6,0, в «окнах» болот – до 5,4–5,8 ед. рН. Данные величины незначительно (до 1,1–1,2 ПДК р. х.) ниже предельно допустимой величины рН (6,5–8,5).

По величине общей жесткости вода большинства озер характеризовалась как «мягкая» (менее 4,0 ммоль/дм<sup>3</sup>), составляя максимальные значения для проточных озер в долине р. Сумка (4,4–4,9 ммоль/дм<sup>3</sup>). В остальных исследуемых озерах среднегодовые значения данного показателя составляли 0,42–0,94 ммоль/дм<sup>3</sup>, за исключением оз. Моховое – 2,2 ммоль/дм<sup>3</sup>.

Газовый режим характеризовался нормальным насыщением (88–105 %) или перенасыщением (до 206,9 %) кислородом поверхностных слоев воды всех озер: содержание растворенного кислорода изменялось в пределах 7,3–17,3 мг/дм<sup>3</sup>.

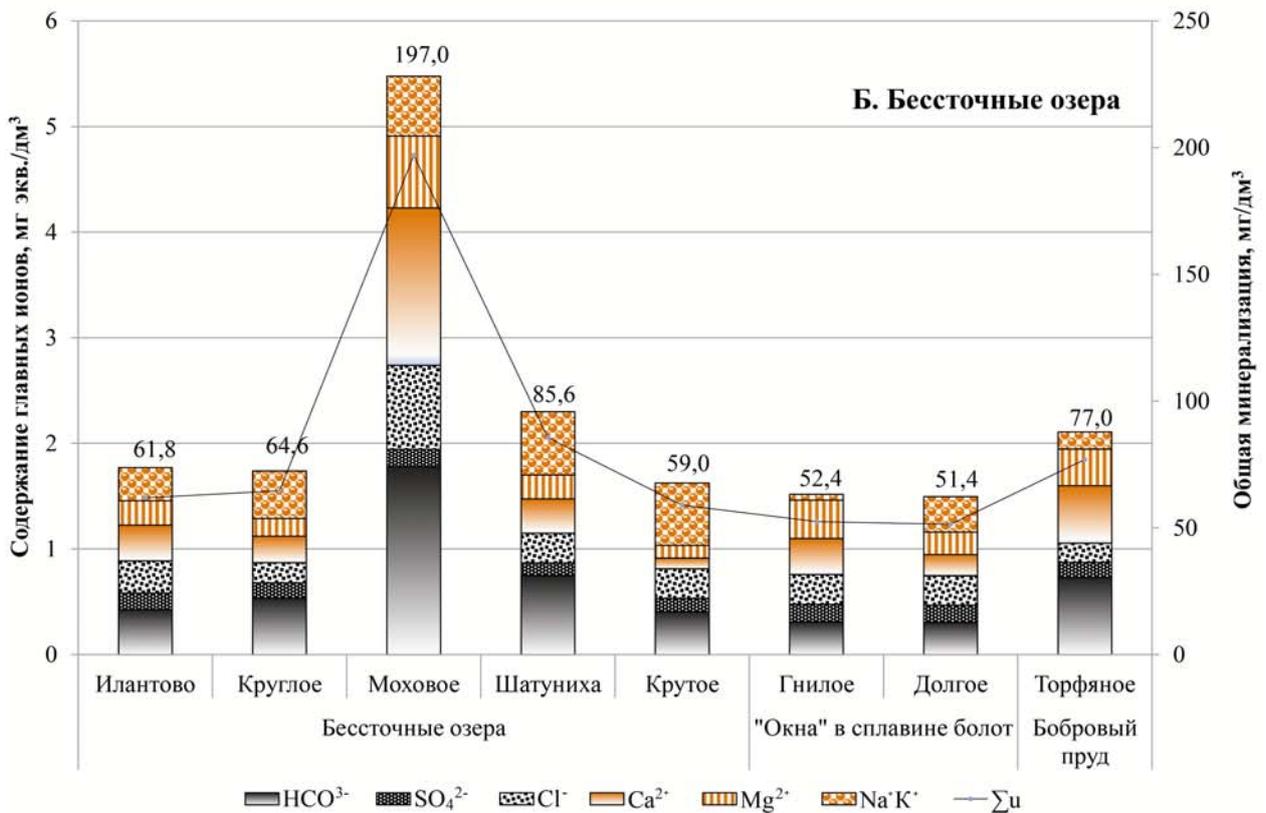
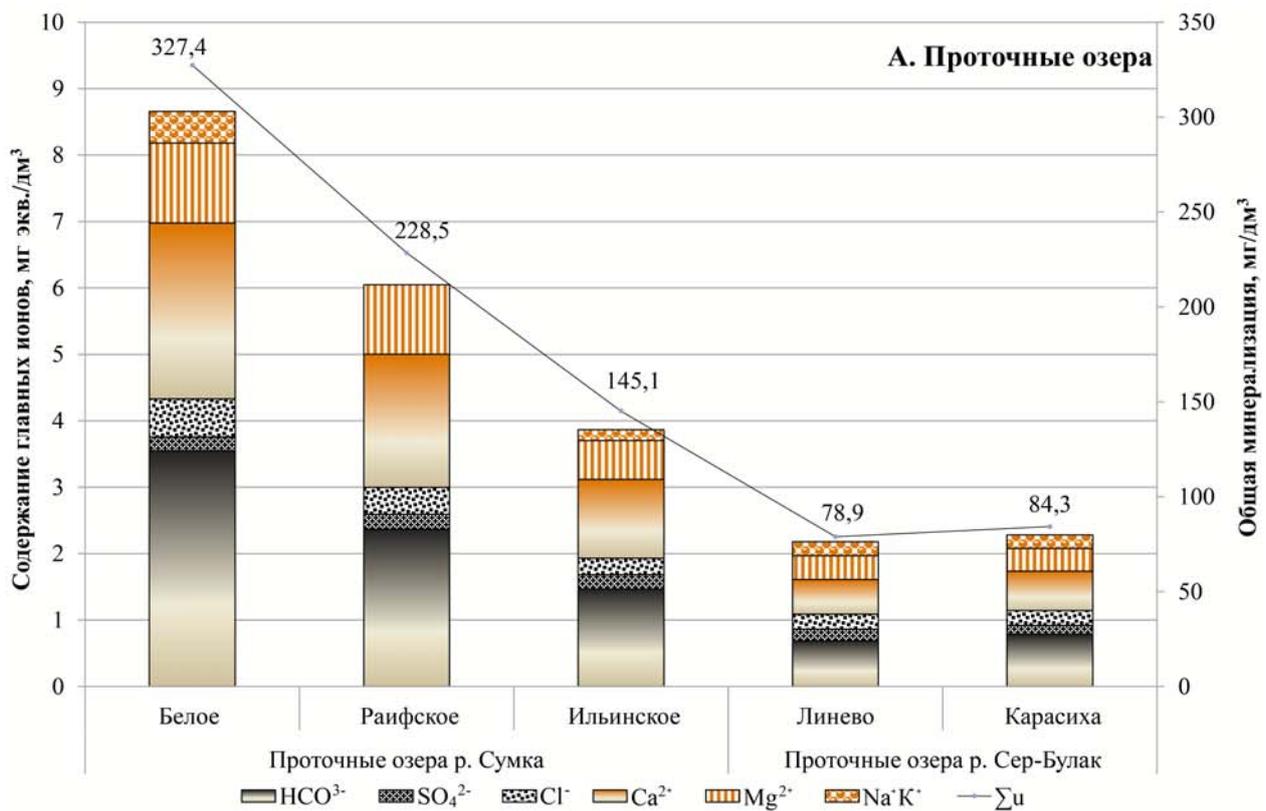


Рис. 2. Содержание главных ионов и изменчивость величины общей минерализации в проточных (А) и бессточных (Б) озерах

Fig.2. Content of the main ions and the variability of the total mineralization in open (A) and closed (Б) lakes

Таблица 1. Ионный состав и формула Курлова разнотипных озер заповедника

Table 1. Ionic composition and Kurlov formula of different types of lakes in the reserve

Группа озер Types of lakes	Название озера Name of lakes	Горизонт Horizon	Ионный состав, мг/дм <sup>3</sup> Ionic composition, mg/dm <sup>3</sup>						Формула Курлова* Kurlov formula *
			HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> Cl <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup> Ca <sup>2+</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup> Mg <sup>2+</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup> Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	
Проточные озера в долине р. Сумка Open lakes in the Sumka River valley	Белое Beloe	Поверхность Surface	197,0–254,0** 218,1±7,3 (n=8)	7,8–14,4 10,6±1,0	18,4–23,4 20,7±0,6	45,6–58,2 50,9±1,7	12,4–15,3 14,4±0,6	1,1–30,8 17,4±3,8	$M_{0,3} \frac{HCO_3 82 Cl 13 SO_4 5}{Ca 61 Mg 27 Na K 12} pH 7,7$
		Дно Bottom	205,0–222,0 214,7±5,0 (n=3)	7,9–10,0 9,3±0,7	19,1–21,3 20,1±0,6	50,3–62,3 55,2±3,6	12,4–16,9 14,8±1,3	0–25,0 12,3±7,2	
	Раифское Raifskoe	Поверхность Surface	103,0–186,0 140,0±8,8 (n=11)	10,0–12,9 11,2±0,4	12,8–17,0 14,9±0,5	34,2–43,6 39,7±0,8	9,0–32,7 12,9±2,0	0–20,4 6,0±2,4	$M_{0,2} \frac{HCO_3 79 Cl 14 SO_4 7}{Ca 62 Mg 31 Na K 12} pH 7,6$
		Дно Bottom	97,6–197,0 148,2±9,6 (n=11)	9,4–11,9 10,6±0,3	10,0–16,1 13,7±0,7	31,8–52,6 40,7±1,7	9,4–28,1 12,5±1,6	0–19,5 5,6±2,0	
	Ильинское Iilinskoe	Поверхность Surface	43,4–111,0 77,7±7,5 (n=10)	10,0–12,5 10,7±0,3	4,9–14,5 8,9±0,9	13,7–27,8 20,4±1,5	4,7–9,2 6,7±0,5	0–17,7 6,3±1,8	$M_{0,2} \frac{HCO_3 75 Cl 13 SO_4 12}{Ca 59 Mg 30 Na K 11} pH 7,9$
		Дно Bottom	67,8–128,0 101,2±5,4 (n=10)	9,3–11,3 10,2±0,2	4,3–10,0 8,8±0,6	24,8–29,6 27,1±0,5	6,6–8,4 7,6±0,2	0–13,7 4,8±1,4	
Проточные озера в долине р. Сер-Булак Open lakes in the Ser-Bulak River valley	Линево Linevo	Поверхность Surface	12,2–59,2 33,4±4,4 (n=12)	6,0–10,0 8,7±0,5	2,8–10,0 7,6±0,9	7,8–14,1 10,1±0,6	1,9–7,2 3,7±0,4	0–15,0 3,9±1,3	$M_{0,08} \frac{HCO_3 61 Cl 22 SO_4 17}{Ca 49 Mg 33 Na K 18} pH 6,7$
		Дно Bottom	12,2–75,7 50,6±5,3 (n=12)	4,4–10,0 7,9±0,7	4,9–14,7 8,5±0,9	7,8–13,0 10,8±0,6	2,9–7,4 5,0±0,5	0–16,2 7,5±1,6	
	Карасиха Karasikha	Поверхность Surface	19,0–67,7 45,5±5,8 (n=8)	3,3–10,0 6,3±1,1	5,7–10,0 8,1±0,6	10,2–14,2 12,5±0,5	2,9–5,3 4,3±0,3	0–9,2 4,4±1,2	$M_{0,08} \frac{HCO_3 67 Cl 20 SO_4 13}{Ca 51 Mg 30 Na K 19} pH 6,6$
		Дно Bottom	19,0–78,6 50,0±6,0 (n=8)	4,3–10,0 6,7±1,0	5,7–10,0 7,7±0,7	9,4–14,9 11,4±0,7	1,4–5,7 3,9±0,5	0–17,2 7,7±2,2	
Бессточные озера Closed lakes	Илантово Ilantovo	Поверхность Surface	12,2–36,6 24,1±2,6 (n=12)	2,9–10,0 7,2±1,0	10,0–10,0 10,0±0	4,0–7,8 6,2±0,3	1,4–4,6 2,6±0,2	0–12,0 7,6±1,1	$M_{0,06} \frac{HCO_3 47 Cl 35 SO_4 18}{Ca 35 Mg 27 Na K 35} pH 6,6$
		Дно Bottom	12,2–47,6 27,8±4,0 (n=12)	3,0–10,0 7,8±1,1	10,0–24,1 11,6±1,6	5,5–12,5 7,4±0,7	1,7–4,7 3,0±0,4	0–17,8 8,4±1,9	
	Круглое Krugloe	Поверхность Surface	14,6–54,2 26,7±5,0 (n=7)	3,4–10,0 5,9±1,1	2,8–10,0 5,3±1,3	3,9–5,9 4,9±0,3	1,4–2,6 1,8±0,2	2,3–30,7 7,9±3,2	$M_{0,07} \frac{HCO_3 60 Cl 22 SO_4 17}{Ca 34 Mg 23 Na K 43} pH 6,7$
		Дно Bottom	16,5–66,4 38,4±14,7 (n=3)	3,8–10,0 7,9±2,1	4,9–10,0 8,3±1,7	4,3–6,3 5,1±3,0	1,4–3,3 2,3±0,6	4,1–30,7 14,6±8,2	
	Моховое Mokhovoe	Поверхность Surface	66,4–116,0 91,1±14,3 (n=3)	4,3–10,0 8,1±1,9	21,6–31,2 25,6±2,9	21,8–29,8 26,1±2,3	6,6–9,5 7,6±0,9	6,9–18,9 11,5±3,7	$M_{0,2} \frac{HCO_3 64 Cl 29 SO_4 7}{Ca 54 Mg 25 Na K 21} pH 6,8$
		Дно Bottom	112,0–151,0 126,0±12,5 (n=3)	3,1–10,0 7,7±2,3	29,8–31,9 30,7±0,6	31,1–36,2 33,7±1,5	7,6–10,4 8,9±0,8	12,3–25,2 16,9±4,2	
	Шатуника Shatunika	Поверхность Surface	25,6–115,0 45,7±11,8 (n=7)	3,0–10,0 5,7±1,1	10,0–10,0 10,0±0	5,6–7,1 7,0±0,2	1,9–3,7 2,8±0,3	7,5–43,9 14,9±4,9	$M_{0,08} \frac{HCO_3 62 Cl 27 SO_4 11}{Ca 31 Mg 22 Na K 47} pH 8,0$
	Крутое Krutoe	Поверхность Surface	10,0–66,4 24,8±7,1 (n=7)	3,3–10,0 6,0±1,2	10,0–10,0 10,0±0	2,0–3,1 2,4±0,2	1,0–2,8 1,7±0,3	8,3–29,8 14,7±2,7	$M_{0,06} \frac{HCO_3 46 Cl 38 SO_4 16}{Ca 13 Mg 15 Na K 72} pH 6,8$

Окончание табл. 1  
Table 1 (continued)

Группа озер Types of lakes	Название озера Name of lakes	Горизонт Horizon	Ионный состав, мг/дм <sup>3</sup> Ionic composition, mg/dm <sup>3</sup>						Формула Курлова* Kurlov formula *
			HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> Cl <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup> Ca <sup>2+</sup> , mg/ dm <sup>3</sup>	Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup> Mg <sup>2+</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup> Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	
«Окна» в спла- вине болот "Win- dows" in bogs	Гнилое Gniloe	Поверх- ность Surface	12,2–20,1 16,6 ± 2,3 (n=3)	4,1–10,0 8,0 ± 2,0	10,0–10,0 10,0 ± 0	3,1–9,3 5,6 ± 1,9	1,9–7,6 3,8 ± 1,9	0,0–9,7 5,8 ± 2,9	M0,05 $\frac{HCO_3 41Cl 37SO_4 22}{Ca 37Mg 38NaK 25}$ pH 6,2
		Дно Bottom	17,6–25,6 21,1 ± 2,4 (n=3)	4,0–10,0 8,0 ± 2,0	10,0–10,0 10,0 ± 0	3,9–10,8 8,0 ± 2,1	1,9–6,6 5,0 ± 1,6	0,0–8,6 2,9 ± 2,9	
	Долгое Dolgoe	Поверх- ность Surface	14,0–21,7 17,8 ± 2,2 (n=3)	3,1–10,0 7,7 ± 2,3	10,0–10,0 10,0 ± 0	2,4–5,1 3,5 ± 0,8	1,2–2,3 1,8 ± 0,3	8,9–11,7 10,2 ± 0,8	M0,05 $\frac{HCO_3 41Cl 38SO_4 21}{Ca 26Mg 29NaK 45}$ pH 5,9
		Дно Bottom	17,6–20,6 19,4 ± 0,9 (n=3)	3,3–10,0 7,8 ± 2,3	10,0–10,0 10,0 ± 0	3,1–5,5 4,4 ± 0,7	1,9–5,7 3,4 ± 0,7	0,0–11,7 6,8 ± 3,5	
Бобро- вый пруд Bobrovui (Beaver) Pond	Торфяное Torfyanoe	Поверх- ность Surface	44,5–44,5 44,5 ± 0(n=2)	3,8–10,0 6,9 ± 3,1	2,8–10,0 6,4 ± 3,4	9,4–12,4 10,9 ± 1,5	2,9–5,6 4,3 ± 1,4	3,5–4,9 4,2 ± 0,7	M0,08 $\frac{HCO_3 71Cl 16SO_4 13}{Ca 51Mg 32NaK 17}$ pH 6,3

Примечание. \*Формула Курлова рассчитана по усредненным значениям (2021–2023 гг.). \*\*Числитель – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее ± ошибка среднего.

Note. \* Kurlov formula is calculated using the average values (2021–2023); \*\* numerator – minimum and maximum values, denominator – mean ± mean error.

Однако в придонных слоях проточных озер, расположенных в долине р. Сер-Булак, и в «окнах» болот всегда отмечался дефицит O<sub>2</sub> (0,8–2,7 мг/дм<sup>3</sup>), что в 2,2–7,5 раза ниже утвержденных норм растворенного кислорода для летнего периода (ПДК р. х. – не менее 6,0 мг/дм<sup>3</sup>). На дне этих озер отмечалось накопление сероводорода и сульфидов, концентрации которых составляли 0,03–0,14 мг/дм<sup>3</sup> (до 28,8 ПДК р. х.).

Уровень биогенной нагрузки и количество органических веществ (по величине БПК<sub>5</sub> и ХПК) различались в каждом водоеме. Величина БПК<sub>5</sub> составляла (мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>): 1,5–4,9 – в проточных озерах, 2,4–9,9 – в бессточных озерах и 3,4–5,5 – в «окнах» сплавин, превышая ПДК р. х. в 2,3–4,7 раза для максимальных значений. Величина ХПК составляла соответственно по типам озер – 12–56, 30–74 и 39–88 мгО/дм<sup>3</sup>, что также составляет 1,9–2,9 ПДК р. х. в максимуме. Среди биогенных элементов выделялось содержание аммоний-иона с максимальными значениями в придонных слоях озер – 1,1–3,9 мг/дм<sup>3</sup> (до 7,8 ПДК р. х.). Концентрации нитритов и нитратов часто соответствовали аналитическому нулю или не превышали по всей толще воды 0,06 мгNO<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> и 4,48 мгNO<sub>3</sub>/дм<sup>3</sup> (в пределах ПДК р. х.). Содержание фосфат-иона в поверхностных слоях всех озер составляло не более 0,05 мг/дм<sup>3</sup>, тогда как в придонных изменялось от 0,3 до

1,43 мг/дм<sup>3</sup>, составляя максимальные значения до 2,92 мг/дм<sup>3</sup> в придонных слоях озер, расположенных в долине р. Сер-Булак. Превышение ПДК р. х. по P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (для эвтрофных водоемов) составляло в этой группе водоемов 2,5–4,2 раза (табл. 2).

В сравнительной характеристике содержания минеральных форм азота и фосфора в разных группах озер выделялась группа проточных озер в долине р. Сер-Булак. Здесь в придонных слоях водоемов постоянно отмечалось повышенное содержание фосфора – до 0,47 мгP-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/дм<sup>3</sup>. Это связано с поступлением болотных вод с водосбора, накоплением на дне значительного слоя донных отложений (по данным Тайсина [2006], до 6 м), сильным антропогенным загрязнением в прошлом и практически полным отсутствием проточности в летний период. В заболачивающихся озерах и «окнах» в сплаvine болот содержание фосфора снижается до 0,21–0,24 мгP-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/дм<sup>3</sup>. Содержание азота минерального также различается по группам озер (мгN/дм<sup>3</sup>): в проточных озерах р. Сумка накопление в придонных слоях составляет 0,8–1,7; в проточных озерах р. Сер-Булак – 1,9–2,1, в бессточных озерах – 0,4–1,6, в «окнах» болот – 1,03–2,8. Максимальные значения отмечаются для водоемов, расположенных в долине или около р. Сер-Булак (рис. 3).

Таблица 2. Содержание органических и биогенных веществ в разнотипных озерах

Table 2. Content of organic substances and nutrients indifferent types of lakes

Группа озер Types of lakes	Название озера Name of lakes	Горизонт Horizon	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>	
	ПДК <sub>р.к.</sub>		2,0		0,5	0,08	40,0	0,2 (P)	
Проточные озера в долине р. Сумка Open lakes in the Sumka River valley	Белое Beloe	Поверхность Surface	4,16–9,47* 6,18 ± 0,83 (n=8)	26,7–43,3 32,5 ± 2,4	0,11–0,34 0,19 ± 0,03	0,02–0,05 0,03 ± 0,0	0,28–1,07 0,46 ± 0,10	0,06–0,11 0,07 ± 0,01	
		Дно Bottom	4,80–6,40 5,74 ± 0,48 (n=3)	2,3–35,8 27,9 ± 4,0	0,26–1,07 0,69 ± 0,24	0,02–0,04 0,03 ± 0,0	0,36–0,67 0,50 ± 0,09	0,09–0,14 0,11 ± 0,01	
	Раифское Raifskoe	Поверхность Surface	1,18–4,30 2,11 ± 0,27 (n=11)	12,0–47,0 20,1 ± 2,9	0,05–0,43 0,13 ± 0,03	0,01–2,0 0,20 ± 0,18	0,10–0,72 0,30 ± 0,05	0,01–0,05 0,03 ± 0,01	
		Дно Bottom	1,78–2,76 2,18 ± 0,10 (n=11)	13,4–35,5 20,9 ± 2,0	0,34–2,20 1,37 ± 0,19	0,02–0,55 0,10 ± 0,05	0,10–3,27 1,41 ± 0,29	0,02–0,81 0,25 ± 0,07	
	Ильинское Ilinskoe	Поверхность Surface	2,72–9,01 6,16 ± 0,63 (n=10)	23,0–39,4 28,5 ± 1,7	0,08–0,26 0,13 ± 0,02	0,01–0,02 0,02 ± 0,0	0,21–1,21 0,37 ± 0,09	0,02–0,06 0,04 ± 0,0	
		Дно Bottom	0,82–4,60 2,95 ± 0,32 (n=10)	17,5–23,5 20,8 ± 0,6	0,37–2,80 1,05 ± 0,22	0,02–0,10 0,06 ± 0,01	0,22–4,48 1,84 ± 0,4	0,06–0,96 0,32 ± 0,08	
Проточные озера в долине р. Сер-Булак Open lakes in the Ser-Bulak River valley	Линево Linevo	Поверхность Surface	2,10–5,91 3,79 ± 0,31 (n=12)	45,7–59,8 54,3 ± 1,0	0,05–0,71 0,36 ± 0,06	0,02–0,04 0,02 ± 0	0,51–1,17 0,79 ± 0,06	0,02–0,21 0,11 ± 0,02	
		Дно Bottom	2,10–5,69 3,59 ± 0,35 (n=12)	52,0–70,0 60,1 ± 1,7	0,52–3,90 1,86 ± 0,32	0,02–0,03 0,02 ± 0,0	0,49–1,79 1,09 ± 0,09	0,07–2,92 1,43 ± 0,24	
	Карасиха Karasikha	Поверхность Surface	1,50–7,80 3,16 ± 0,74 (n=8)	36,0–60,0 53,4 ± 2,9	0,14–0,59 0,28 ± 0,05	0,02–0,05 0,03 ± 0,01	0,64–1,25 1,02 ± 0,07	0,03–0,38 0,16 ± 0,05	
		Дно Bottom	2,43–7,40 4,57 ± 0,64 (n=8)	37,0–65,0 56,7 ± 3,1	0,79–3,84 1,64 ± 0,33	0,02–0,06 0,03 ± 0,01	0,60–1,57 1,19 ± 0,1	0,62–2,61 1,31 ± 0,20	
Бессточные озера Closed lakes	Илантово Ilantovo	Поверхность Surface	2,40–7,90 4,80 ± 0,54 (n=12)	35,0–67,0 47,9 ± 3,0	0,05–0,73 0,25 ± 0,06	0,02–0,03 0,02 ± 0,0	0,32–0,83 0,59 ± 0,05	0,01–0,05 0,04 ± 0,0	
		Дно Bottom	2,777–8,91 6,07 ± 0,64 (n=12)	39,5–80,0 54,2 ± 4,6	0,05–0,78 0,26 ± 0,08	0,02–0,02 0,02 ± 0,0	0,42–0,93 0,67 ± 0,06	0,02–0,06 0,04 ± 0,01	
	Круглое Krugloe	Поверхность Surface	3,53–7,49 5,13 ± 0,62 (n=7)	28,5–52,0 37,3 ± 3,3	0,05–0,48 0,22 ± 0,05	0,02–0,03 0,02 ± 0,0	0,28–0,82 0,47 ± 0,06	0,02–0,05 0,03 ± 0,0	
		Дно Bottom	6,01–7,80 6,81 ± 0,53 (n=3)	36,5–57,0 45,7 ± 6,0	0,16–0,57 0,42 ± 0,13	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	0,38–0,74 0,56 ± 0,011	0,03–0,05 0,04 ± 0,01	
	Моховое Mokhovoe	Поверхность Surface	2,26–4,05 3,11 ± 0,52 (n=3)	30,0–41,1 36,9 ± 3,5	0,05–0,12 0,09 ± 0,02	0,02–0,03 0,02 ± 0	0,39–0,68 0,54 ± 0,08	0,02–0,05 0,04 ± 0,01	
		Дно Bottom	2,16–5,46 3,91 ± 0,96 (n=3)	40,0–46,0 43,4 ± 1,8	1,14–1,57 1,37 ± 0,13	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	0,81–1,21 0,96 ± 0,13	0,59–0,66 0,62 ± 0,02	
	Шатуниха Shatunikha	Поверхность Surface	2,51–8,96 6,67 ± 0,90 (n=7)	39,6–74,0 62,0 ± 4,6	0,07–0,51 0,22 ± 0,06	0,02–0,03 0,02 ± 0	0,36–0,56 0,47 ± 0,03	0,03–0,15 0,06 ± 0,02	
	Крутое Krutoe	Поверхность Surface	4,48–9,90 6,86 ± 0,73 (n=7)	29,8–55,7 44,4 ± 4,5	0,06–0,50 0,25 ± 0,07	0,02–0,23 0,05 ± 0,03	0,40–0,99 0,52 ± 0,08	0,02–0,11 0,05 ± 0,01	
	«Окна» в сплаvine болот "Windows" in bogs	Гнилое Gniloe	Поверхность Surface	2,08–5,49 3,49 ± 1,03 (n=3)	56,0–66,0 62,7 ± 3,3	0,05–0,72 0,30 ± 0,21	0,02–0,05 0,03 ± 0,01	0,83–1,60 1,25 ± 0,23	0,05–0,05 0,05 ± 0
			Дно Bottom	2,28–6,91 4,95 ± 1,38 (n=3)	70,2–88,0 80,4 ± 5,3	1,50–3,50 2,37 ± 0,59	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	1,15–1,96 1,67 ± 0,26	0,54–1,00 0,71 ± 0,14
Долгое Dolgoe		Поверхность Surface	3,11–7,66 4,71 ± 1,48 (n=3)	39,0–51,5 43,2 ± 4,2	0,05–1,41 0,63 ± 0,41	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	0,75–1,21 0,95 ± 0,14	0,03–0,05 0,04 ± 0,01	
		Дно Bottom	3,25–6,60 4,98 ± 0,97 (n=3)	43,7–48,0 45,2 ± 1,4	0,60–1,08 0,78 ± 0,15	0,02–0,04 0,03 ± 0,01	0,95–1,22 1,04 ± 0,09	0,18–0,41 0,30 ± 0,06	
Бобровый пруд Bobrovyy (Beaver) Pond	Торфяное Torfinoe	Поверхность Surface	2,80–3,70 3,25 ± 0,45 (n=3)	35,0–74,5 54,8 ± 19,8	0,33–0,68 0,50 ± 0,18	0,02–0,03 0,03 ± 0,01	0,40–1,25 0,83 ± 0,42	0,11–0,47 0,29 ± 0,18	

Примечание. \*Числитель – минимальное и максимальные значения, знаменатель – среднее ± ошибка среднего.

Note. \*Numerator – minimum and maximum values, denominator – mean ± mean error.

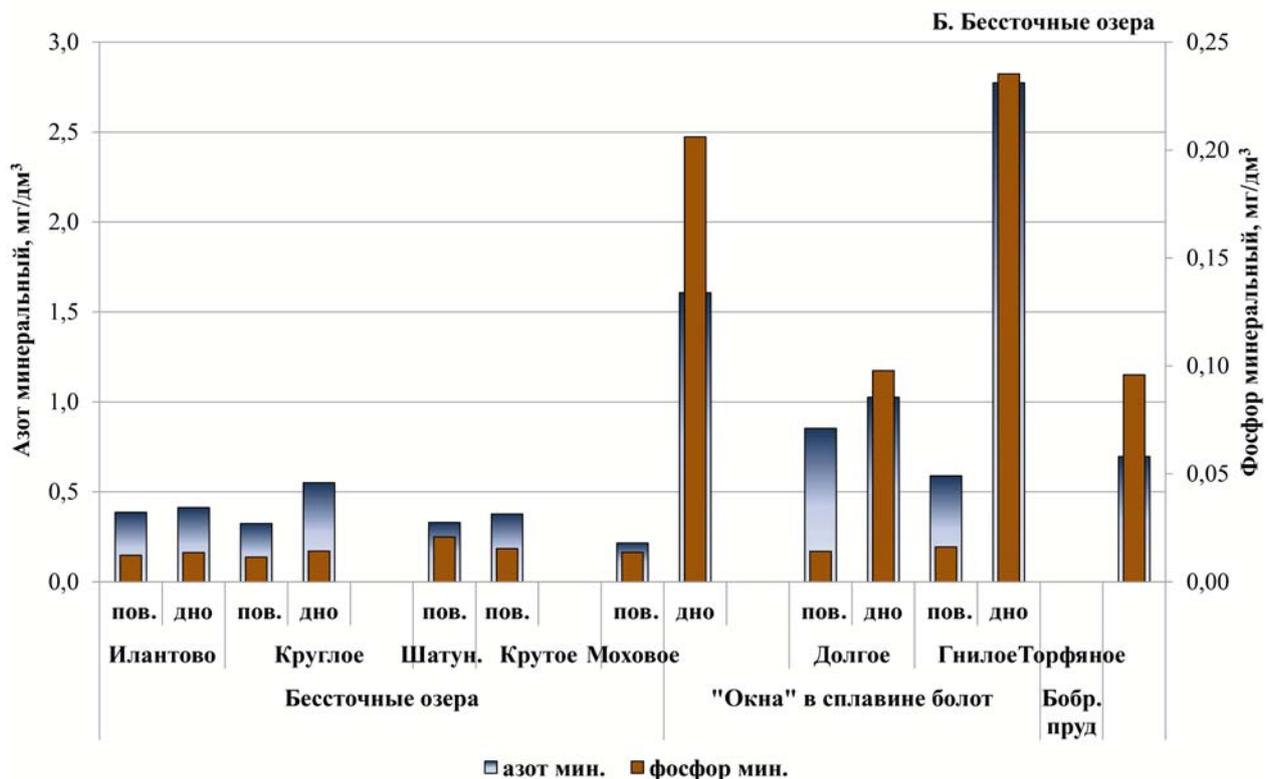
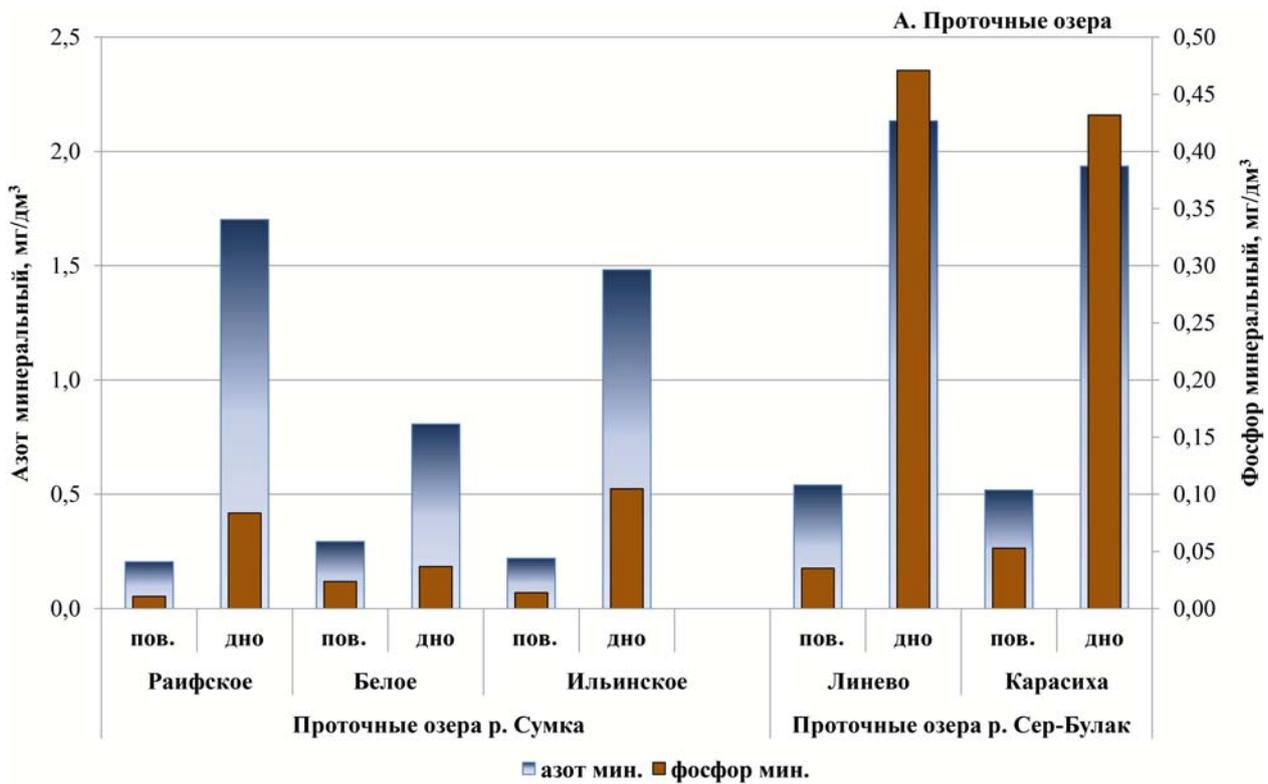


Рис. 3. Содержание минеральных форм азота и фосфора в проточных (А) и бессточных озерах (Б) заповедника по усредненным данным за 2021–2023 гг.

Fig. 3. Content of mineral forms of nitrogen and phosphorus in open (A) and closed lakes (Б) of the reserve according to the average data for 2021–2023

В многолетней динамике (за последние 15 лет) отмечается тенденция на незначительное снижение содержания минеральных форм азота и фосфора как в поверхностных, так и в придонных слоях воды разнотипных озер (рис. 4). Для анализа мы выбрали основные – «модельные» – озера, характеризующие каждую группу. В глубоководном проточном оз. Раифское накопление азота на дне значительное, и поэтому снижение содержания азота минерального происходит в меньшей степени. Для проточного оз. Линево, расположенного в заболоченном водосборе, характерна выраженная тенденция снижения содержания  $N_{\text{мин}}$  и  $P-PO_4^{3-}$  в результате процессов самоочищения. Аналогичные тенденции можно отмечать и в бессточных озерах Илантово и Долгое, несмотря на их зарастание и заболачивание. Следует считать, что в настоящее время данный уровень содержания биогенных веществ близок к естественному.

За период наблюдений в воде озер фиксировалось превышение рыбохозяйственных нормативов по марганцу – 1,7–54,1 ПДК, железу общему – 2,7–70 ПДК, меди – 2,3–5,4 ПДК; концентрация цинка, никеля, свинца не превышала допустимых норм. Значительные превышения тяжелых металлов обусловлены геохимическими характеристиками региона и заболачиванием водоемов. В заболачивающихся озерах эти показатели всегда выше, что связано с закислением и накоплением легкорастворимых органических форм, способствующих образованию растворимых соединений металлов. Именно металлы определяли оценку качества воды.

Результаты расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) показали, что качество воды озер изменялось от «слабозагрязненной» (2 класс качества) до «экстремально грязной» (5 класса качества). В химическом составе воды разнотипных водоемов отмечены существенные изменения в течение исследуемого периода: коэффициент комплексности загрязненности изменялся от 10 до 80 %, составляя максимальные значения в придонных слоях воды озер. Из определяемых показателей загрязняющими являлись легкоокисляемые органические вещества (по БПК<sub>5</sub>), фенолы и ряд металлов (соединения железа, меди, марганца). К критическим показателям загрязненности ( $S_{ij} > 9$ ) относилось биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>), который был выявлен в проточных озерах Ильинское и Линево и практически во всех бессточных озерах. В проточных озерах р. Сер-Булак отмечены значительные величины индекса загрязнения для таких биогенных веществ,

как ион аммония и фосфат-ион: именно в этих водоемах значение УКИЗВ выше, чем в остальных озерах Раифского участка. Для всех озер отмечен экстремально высокий уровень загрязненности по таким показателям, как БПК<sub>5</sub>, ХПК, железо общее, фенолы, медь и марганец, средний уровень загрязненности – по аммоний-иону и растворенному кислороду. По повторяемости случаев загрязненности каждым из рассматриваемых ингредиентов загрязненность воды определялась как «характерная».

## Заключение

Гидрохимический режим водоемов Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны формируется за счет особенностей водосбора, где существенную роль играет антропогенный фактор. Газовый режим озер имеет признаки эвтрофии: перенасыщение растворенным кислородом поверхностных слоев воды и резкий дефицит  $O_2$  у дна; накопление сероводорода в придонных слоях воды, особенно в глубоководных и заболачивающихся озерах. Превышения ПДК р. х. по иону аммония и фосфору фосфатов часто отмечаются в придонных слоях проточных озер р. Сер-Булак, имеющих заболоченный водосбор, и в «окнах» в сплавах торфяных болот. В воде озер регулярно отмечается высокая концентрация тяжелых металлов – железа общего, меди, марганца, их максимальные значения фиксируются в проточных озерах. Это связано с геохимическими особенностями территории и существенно влияет на оценку степени загрязнения озер. Однако, анализируя оригинальные многолетние данные, можно отметить стабилизацию химического состава заповедных, особенно проточных озер за счет снижения интенсивности сельского хозяйства на территории водосбора и уменьшения объема речного стока. Содержание минеральных форм азота и фосфора за последние 15 лет уменьшается не только в поверхностных, но и в придонных слоях воды, что указывает на процессы самоочищения даже в зарастающих и заболачивающихся озерах. Выполненные исследования химического состава водоемов с корректировкой частоты отбора проб демонстрируют более точные результаты, которые позволяют разработать оптимальную программу мониторинга для отдельно взятого ООПТ. В данном случае рекомендуется организация мониторинга на основных водоемах для каждой выделенной группы с частотой отбора каждый месяц в период открытой воды, с проведением контрольных отборов проб на удаленных заповедных участках.

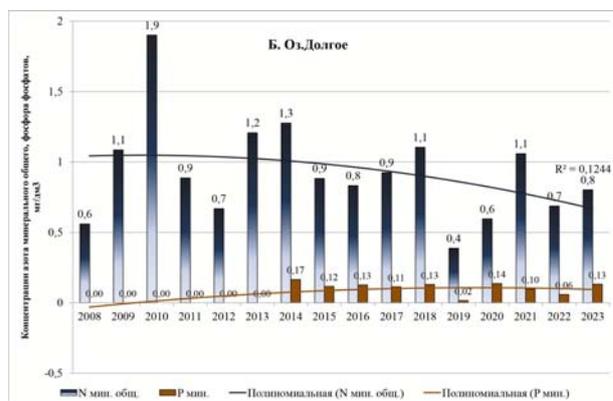
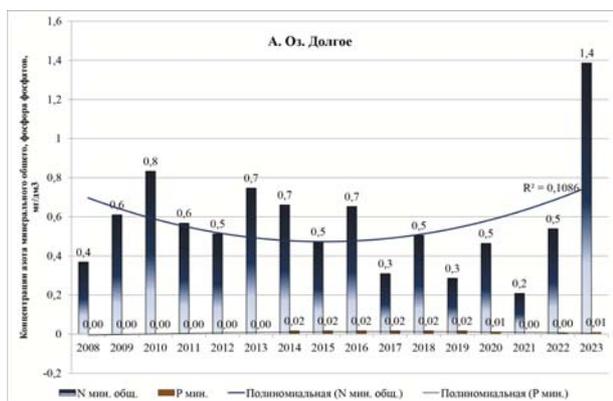
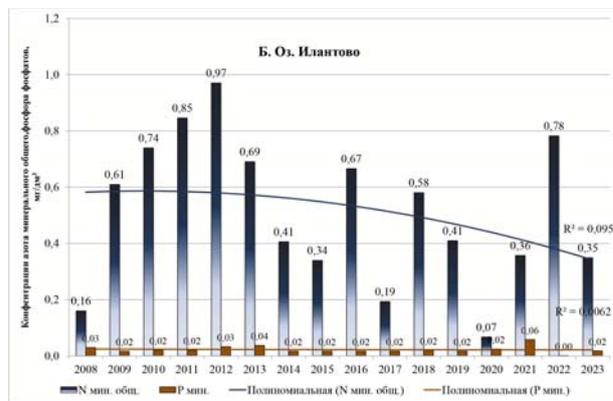
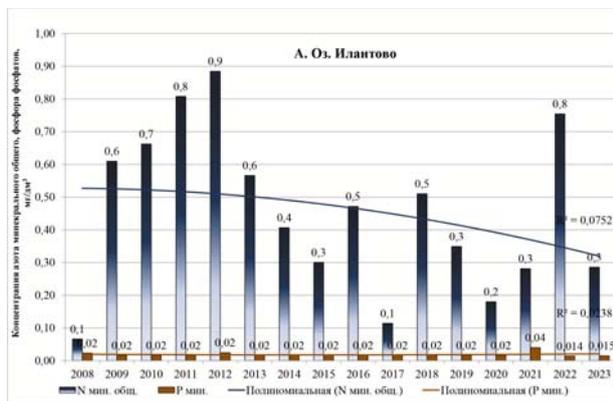
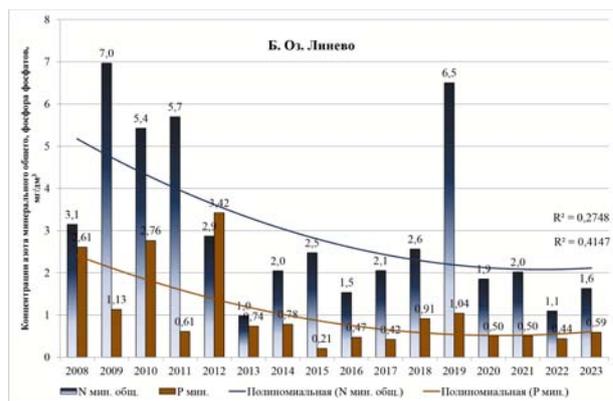
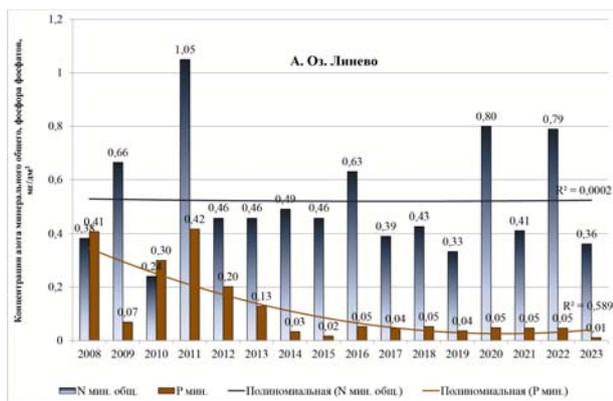
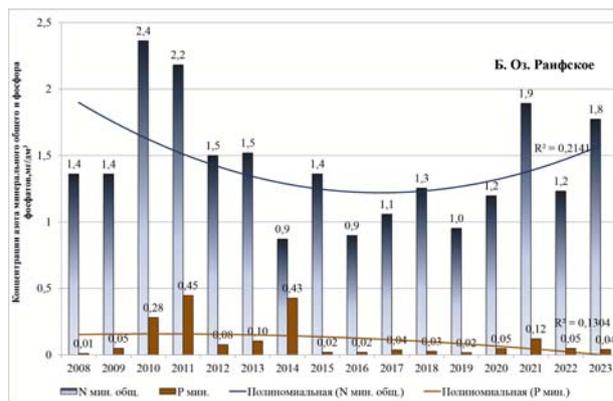
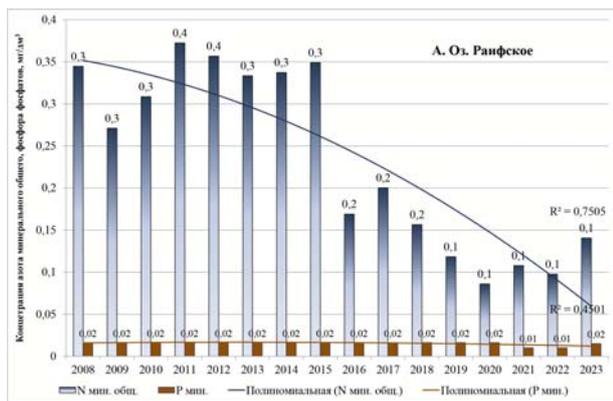


Рис. 4. Динамика концентрации азота минерального и фосфора фосфатов в поверхностных (А) и придонных (Б) слоях воды в основных исследуемых озерах за 2008–2023 гг.

Fig. 4. Dynamics of concentrations of mineral total nitrogen and phosphorus phosphates in the surface (A) and bottom (Б) layers of water in the main studied lakes for 2008–2023

Это позволит осуществлять контроль за состоянием и изменениями химического состава охраняемых водоемов на всей территории водосборного бассейна.

## Литература

Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 442 с.

Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями и дополнениями 12 октября 2018 г., 10 марта 2020 г.).

РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.

Тайсин А. С. Озера Приказанского района, их природные и антропогенные изменения. Казань: Изд-во ТГГПУ, 2006. 167 с.

Унковская Е. Н., Шагидуллин Р. Р., Тарасов О. Ю., Юронец-Лужаева Р. Ч. Динамика химического состава озер Волжско-Камского заповедника // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2009. Т. 18, № 4. 114–120.

Унковская Е. Н., Тарасов О. Ю. Гидрохимический режим водоемов и водотоков Раифского участка Волжско-Камского заповедника и его охранной зоны // Труды Волжско-Камского государ-

ственного природного заповедника. Вып. 7. Казань, 2016. С. 9–40.

## References

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

Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated December 13, 2016 N 552 'On approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance' (as amended and supplemented on October 12, 2018; March 10, 2020). (In Russ.)

RD 52.24.643-2002. Method of complex assessment of surface water pollution degree by hydrochemical indicators. (In Russ.)

Taisin A. S. Lakes of the Prikazansky District, their natural and anthropogenic changes. Kazan': TGGPU; 2006. 167 p. (In Russ.)

Unkovskaya E. N., Shagidullin R. R., Tarasov O. Yu., Yuranets-Luzhaeva R. Ch. Dynamics of chemical composition of lakes of the Volga-Kama Reserve. *Samar-skaya Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii = Samara Luka: Problems of Regional and Global Ecology*. 2009;18(4):114–120. (In Russ.)

Unkovskaya E. N., Tarasov O. Yu. Hydrochemical regime of reservoirs and watercourses of the Raif section of the Volzhsko-Kamsky Nature Reserve and its protection zone. *Trudy Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika = Proceedings of the Volzhsko-Kamsky State Nature Reserve*. Iss. 7. Kazan; 2016. P. 9–40. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 27.12.2023; принята к публикации / accepted: 29.02.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Унковская Елена Николаевна

старший научный сотрудник, заместитель директора по управлению, экологическому образованию и экотуризму

e-mail: l-unka@mail.ru

### Косова Мария Владимировна

аспирант КФУ, младший научный сотрудник ИПЭН АН РТ

e-mail: mary.burunina96.5@yandex.ru

### Шурмина Надежда Васильевна

научный сотрудник

e-mail: schurmina2015@yandex.ru

### Мухаметзянова Фания Максимовна

младший научный сотрудник

e-mail: fania2691@gmail.com

### Игнатъев Юрий Алексеевич

старший научный сотрудник

e-mail: chromjura@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Unkovskaya, Elena

Senior Researcher, Deputy Director for Management, Environmental Education and Tourism

### Kosova, Mariya

Postgraduate Student, KFU; Junior Researcher, Institute of Ecology and Subsoil Use

### Shurmina, Nadezhda

Researcher

### Mukhametzyanova, Faniya

Junior Researcher

### Ignatiev, Yuri

Senior Researcher

УДК 574.52

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ОЗЕР БЕЛОЕ И ЛИПОВСКОЕ (КУРГАЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

А. Г. Русанов\*, Т. Ю. Газизова, А. Е. Лапенков, Т. В. Сапелко

Институт озероведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), \*rusanov@limno.ru

В августе 2023 г. проведено исследование сообществ высших водных растений в озерах Белое и Липовское, расположенных на территории Государственного природного заказника регионального значения «Кургальский». Видовой состав и пространственное распределение сообществ макрофитов фиксировались стандартным методом картирования фитолиторали. Изменение распределения макрофитов с глубиной изучали на трансектах в ходе водолазных работ. В олиготрофном оз. Белом доминируют погруженные гидрофиты *Lobelia dortmanna* с *Isoetes echinospora*, *I. lacustris*, *Myriophyllum alterniflorum* и *Littorella uniflora*. Глубина распространения лобелиевых сообществ в оз. Белом достигает 4 м. Сообщества гелофитов образуются *Phragmites australis* с *Scirpus lacustris* и *Typha latifolia*. Погруженные гидрофиты превышают по площади гелофиты в 4 раза. В солоноватом оз. Липовском произрастают как обычные пресноводные виды, так и виды, типичные для солоноводных водоемов. Сообщества гелофитов состоят преимущественно из *Phragmites australis* с *Bolboschoenus maritimus* и *Scirpus lacustris*. Сообщества погруженных макрофитов в основном состоят из *Potamogeton perfoliatus*, *P. pectinatus*, *Myriophyllum sibiricum*, *Batrachium marinum* и *Najas marina*. Глубина распространения погруженных макрофитов в оз. Липовском достигает 3,5 м; площадь погруженных гидрофитов в нем превышает площадь гелофитов всего в 1,7 раза. Пологий уклон дна и высокая прозрачность воды способствуют более выраженному доминированию погруженных растений в оз. Белом по сравнению с оз. Липовским. Доминирование лобелиевых сообществ в оз. Белом соответствует олиготрофным условиям в водоеме. Широкое распространение в оз. Липовском видов – показателей эвтрофных (*Potamogeton pectinatus*, *Najas marina*) и мезотрофных (*Potamogeton perfoliatus*) условий указывает на мезотрофно-эвтрофный статус водоема.

Ключевые слова: высшая водная растительность; флористический состав; погруженные гидрофиты; гелофиты; олиготрофные озера; солоноватые озера

Для цитирования: Русанов А. Г., Газизова Т. Ю., Лапенков А. Е., Сапелко Т. В. Современное состояние растительного покрова озер Белое и Липовское (Кургальский полуостров) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 51–64. doi: 10.17076/lim1864

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств гранта Российского научного фонда № 23-27-00128 (<https://rscf.ru/project/23-27-00128/>).

**A. G. Rusanov\*, T. Yu. Gazizova, A. E. Lapenkov, T. V. Sapelko. CURRENT STATE OF VEGETATION COVER OF LAKES BELOE AND LIPOVSKOE (KURGALSKY PENINSULA)**

*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), \*rusanov@limno.ru*

In August 2023, a study of aquatic vascular plant communities was carried out in Lakes Beloe and Lipovskoe, located on the territory of the Kurgalsky State Nature Reserve of regional importance. The species composition and spatial distribution of macrophyte communities were recorded using the standard phytolittoral mapping method. Changes in the distribution of macrophytes by depth were studied on transects with scuba diving. In an oligotrophic Lake Beloe, submerged plant communities are formed by *Lobelia dortmanna* with *Isoetes echinospora*, *I. lacustris*, *Myriophyllum alterniflorum* and *Littorella uniflora*. The depth of distribution of *Lobelia* communities in Lake Beloe reaches 4 m. Helophyte communities are dominated by *Phragmites australis* with *Scirpus lacustris* and *Typha latifolia*. Submerged hydrophytes exceed the area of helophytes by 4 times. In a brackish Lake Lipovskoe, both common freshwater species and species typical of saltwater bodies occur. Helophyte communities consist predominantly of *Phragmites australis* with *Bolboschoenus maritimus* and *Scirpus lacustris*. Submerged communities are composed of *Potamogeton perfoliatus*, *P. pectinatus*, *Myriophyllum sibiricum*, *Batrachium marinum* and *Najas marina*. Depth of distribution of submerged macrophytes in Lake Lipovskoe reaches 3.5 m. In Lake Lipovskoe, the area of submerged hydrophytes exceeds the area of helophytes by only 1.7 times. Gently sloping shores and high water transparency contribute to a more pronounced dominance of submerged plants in Lake Beloe compared to Lake Lipovskoe. In Lake Beloe, the dominance of *Lobelia* communities corresponds to oligotrophic conditions. In Lake Lipovskoe, the widespread distribution of eutraphent (*Potamogeton pectinatus*, *Najas marina*) and mesotraphent (*Potamogeton perfoliatus*) species indicate meso-eutrophic status of the lake.

**Keywords:** aquatic vascular vegetation; floristic composition; submerged hydrophytes; helophytes; oligotrophic lakes; brackish lakes

For citation: Rusanov A. G., Gazizova T. Yu., Lapenkov A. E., Sapelko T. V. Current state of vegetation cover of lakes Beloe and Lipovskoe (Kurgalsky Peninsula). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 51–64. doi: 10.17076/lim1864

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 23-27-00128 (<https://rscf.ru/project/23-27-00128/>).

## Введение

Государственный природный заказник регионального значения «Кургальский» был создан в 2000 г. на основе Государственного зоологического (охотничьего) заказника «Кургальский полуостров» [Водно-болотные..., 1998]. Как и прежде, приоритетной задачей заказника является сохранение эталонов природных комплексов приморских ландшафтов на южном побережье Финского залива и охрана редких видов фауны и флоры. Озера Белое и Липовское – самые крупные озера на территории заказника, расположенные в северной части Кургальского полуострова. Видовой состав водной флоры озер Белого и Липовского уникален для своего региона, о чем свидетельствуют недавние исследования флористического разнообразия водных объектов заказника «Кургальский» [Глазкова и др., 2018, 2020]. Озеро Белое – уль-

трапесный олиготрофный водоем, в котором отмечаются сообщества редкого амфиатлантического вида *Lobelia dortmanna* L. Озеро Липовское – солоноводный водоем, в котором произрастают как обычные пресноводные виды, так и виды, типичные для солоноватых вод. Однако, несмотря на наличие довольно подробных данных о видовом составе макрофитов, в озерах до сих пор остается неизученным характер зарастания берегов и глубина распространения водной растительности.

Флористический состав и особенности распределения водной растительности с глубиной являются важными характеристиками трофического статуса водоемов [Hutchinson, 1975]. Целью настоящего исследования являлось изучение видового состава макрофитов и степени зарастания озер Белое и Липовское, а также оценка их современного экологического состояния.

## Материалы и методы

Озера Белое и Липовское расположены на Кургальском полуострове (Ленинградская область). Озеро Белое (площадь 3,2 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 13,1 м) является ультрапресным олиготрофным водоемом с низким значением минерализации воды 0,052 г/л [Станиславская и др., 2021]. Озеро бессточное, без притоков, питание родниковое [Станиславская и др., 2021], расположено на отметке 23 м над уровнем моря. Севернее оз. Белого находится солоноватое оз. Липовское (площадь 5,3 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 16,9 м), которое в настоящее время расположено на уровне моря и имеет соединение с Финским заливом в виде искусственной протоки глубиной до 1,5 м в районе д. Курголово. Водообмен в озере происходит за счет сгонно-нагонных явлений. Минерализация воды составляет 3,8 г/л [Станиславская и др., 2021]. Водоем является уникальным для прибрежной зоны Финского залива, поскольку это единственное в регионе солоноводное озеро.

Определение видового состава и пространственного распределения зарослей макрофитов в озерах Белое и Липовское проведено в период максимального развития высшей водной растительности (первая декада августа)

при помощи стандартного метода картирования фитолиторали при объезде берегов на лодке [Катанская, 1981; Kolada et al., 2009]. Границы зарослей основных растительных ассоциаций и экологических групп макрофитов, включая воздушно-водные, плавающие и погруженные растения, определялись по GPS-координатам, полученным в ходе полевого исследования. Площади зарастания экологических групп макрофитов и общая площадь покрытия макрофитами были подсчитаны в среде ArcView GIS. Для определения воздушно-сухой надземной фитомассы в лабораторных условиях был предварительно проведен отбор укосов доминирующих растительных ассоциаций [Катанская, 1981]. Глубина распространения водной растительности определялась либо с помощью бентосного дночерпателя, либо в ходе водолазных работ. Водолазные работы выполнялись на двух трансектах в оз. Белом и на трех трансектах в оз. Липовском. Протяженность трансект составляет 48–60 м, частота точек описания – 2 м (рис. 1, табл. 1). Для оз. Липовского было также сделано одно описание (с берега, без закладывания трансекты). Одновременно проводили измерения прозрачности воды по диску Секки. В оз. Белом прозрачность воды составляла 6 м, в оз. Липовском – всего 2 м.

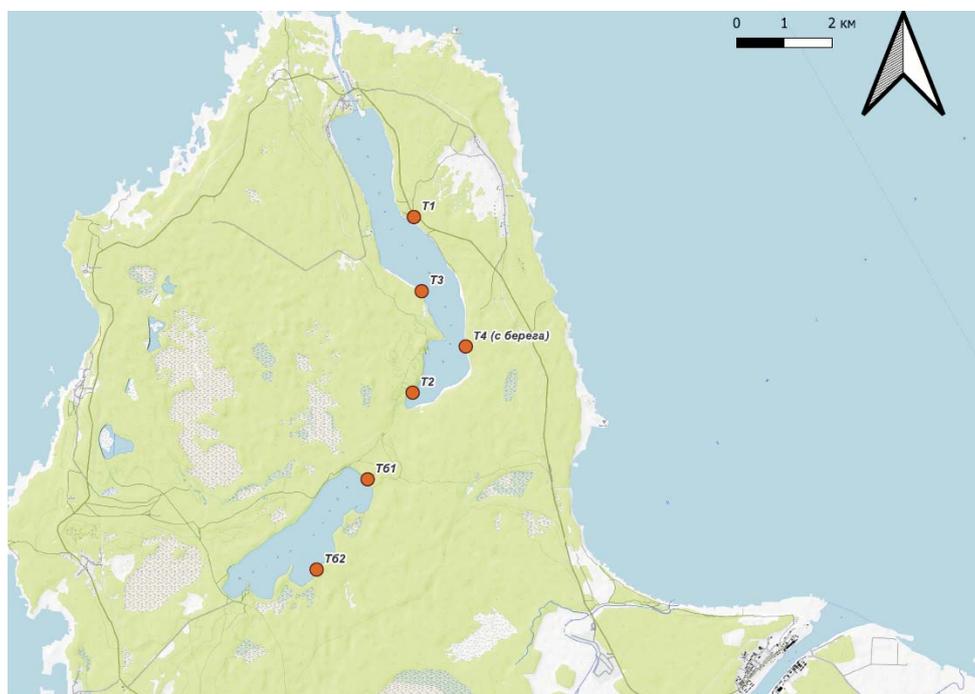


Рис. 1. Расположение трансект для описания водной растительности в озерах Белое и Липовское (Кургальский полуостров)

Fig. 1. Location of the transects for the description of aquatic vegetation in Lakes Beloe and Lipovskoe (Kurgalsky Peninsula)

Таблица 1. Географические координаты и протяженность трансект для описания водной растительности в озерах Белое и Липовское

Table 1. Geographic coordinates and extent of the transects for the description of aquatic vegetation in Lakes Beloe and Lipovskoe

Трансекта № Transect no.	Координаты Coordinates	Протяженность, м Extent, m
Озеро Белое Lake Beloe		
1	59°42'04"N, 28°08'14.9"E	60
2	59°41'02.5"N, 28°07'6.5"E	60
Озеро Липовское Lake Lipovskoe		
1	59°45'02.7"N, 28°09'16.92"E	60
2	59°43'03.08"N, 28°09'15.28"E	60
3	59°44'12.2"N, 28°09'27.4"E	48
4 (с берега)	59°43'34.56"N, 28°10'26.5"E	-

## Результаты

### Озеро Белое

В составе высшей водной растительности оз. Белого выявлено 19 видов, из которых 6 – погруженные гидрофиты (*Nitella* sp., *Isoetes echinospora* Durieu, *I. lacustris* L., *Littorella uniflora* (L.) Aschers., *Lobelia dortmanna* L. и *Myriophyllum alterniflorum* DC.), один плавающий гидрофит (*Nuphar lutea* (L.) Smith), 8 гелофитов (*Equisetum fluviatile* L., *Carex acuta* L., *Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmb., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Sagittaria sagittifolia* L., *Scirpus lacustris* L., *Sparganium angustifolium* Michx. и *Typha latifolia* L.) и 4 гидрофита (*Eleocharis acicularis* (L.) Roem., *E. palustris* (L.) Roem. et Schult., *Juncus supinus* Moench (*J. bulbosus* auct., non L.) и *Ranunculus reptans* L.).

В оз. Белом дно песчаных берегов покрыто сплошными зарослями редкого амфиатлантического вида – лобелии Дотманна (*Lobelia dortmanna*), занесенной в Красную книгу Ленинградской области [2018]. Этот вид образует лобелиевые сообщества, в которых встречаются полушники колючеспорый и озерный (*Isoetes echinospora* и *I. lacustris*) и прибрежница одноцветковая (*Littorella uniflora*), также занесенные в Красную книгу Ленинградской области [2018]. Частым компонентом лобелиевых сообществ в оз. Белом является уруть очередноцветковая (*Myriophyllum alterniflorum*), а также ситняг игольчатый (*Eleocharis acicularis*) и лютик распростертый (*Ranunculus reptans* L.). Хотя отдельные экземпляры лобелии повсеместно встречаются на глубине 3,5–4,0 м, оптимальная глубина произрастания лобелиевых ценозов – 1,5–2,0 м, где располагаются наиболее крупные растения, достигающие 5–6 см в длину (диаметр розетки, объединяющей не-

сколько дочерних боковых побегов, составляет 6–7 см). Фитомасса чистых лобелиевых ценозов составляет 70 г/м<sup>2</sup>. На мелководье (0,5–1,0 м глубины) плотность ценозов лобелии достигает 180 г/м<sup>2</sup> за счет сопутствующих видов (урути, полушников и прибрежницы). В погруженных растительных группировках наблюдается смена сопутствующих видов с глубиной: на мелководье в состав лобелиевых сообществ входят полушники и уруть очередноцветковая, а на глубине их сменяет прибрежница одноцветковая. Повсеместно на мелководье встречается водная форма ситника луковичного (*Juncus supinus* (*J. bulbosus* auct.)), представленного как единичными растениями, так и плотными дерновинками.

Воздушно-водная растительность в основном представлена тростником (*Phragmites australis*), образующим значительные заросли в заливах с песчаным дном по восточному берегу. Среди зарослей тростника встречаются редкие куртины камыша озерного (*Scirpus lacustris*) и рогоза широколистного (*Typha latifolia*). В разрывах зарослей высокотравных гелофитов редко встречаются единичные растения низкотравных гелофитов ежеголовника узколистного (*Sparganium angustifolium*), стрелолиста обыкновенного (*Sagittaria sagittifolia*) и ситняга болотного (*Eleocharis palustris*). На мелководье в заливах можно встретить изреженные заросли кубышки желтой (*Nuphar lutea*).

Значительные участки береговой линии, выдающиеся в озеро на восточном берегу, и практически весь западный берег представлены каменисто-песчаной литоралью. Несмотря на то что каменисто-песчаная литораль практически полностью лишена жесткой воздушно-водной растительности, на ней повсеместно встречается лобелия Дотманна, полушники колючеспорый и озерный и уруть очередноцветковая.

В оз. Белом донные отложения на трансекте 1 (рис. 2) были представлены песком с редкими включениями мелких камней. Небольшие заросли тростника южного растут на мелководье до 6 м от береговой линии. В 10–12 м от берега на глубине около 0,5 м появляется погруженная растительность, представленная урутью очередноцветковой. В 20–22 м от берега на глубине около 1 м появляются первые розетки лобелии Дортманна, а в 32–34 м от берега она уже образует плотные заросли. Вместе с этим обилие урути очередноцветковой постепенно становится меньше, в последней точке трансекты встречаются единичные представители. В конце трансекты донные отложения представлены песком с легким

наилком. За пределами трансекты заросли лобелии Дортманна продолжают до глубины 3 м.

На протяжении всей трансекты 2 (рис. 3) дно озера каменистое, с расстояния 10–12 м – с наилком. На берегу трансекты 2 растет камыш озерный. До 6 м от берега на мелководье расположены заросли тростника южного. Практически сразу от уреза воды встречаются розетки лобелии Дортманна и харовые водоросли (*Nitella* sp.), их заросли продолжают вплоть до конца трансекты на глубине 1,5 м и за ее пределами. Глубина окончания зарослей не установлена, однако они продолжались в точке отбора поверхностной пробы В4 (59°41'08.41"N, 28°07'06.17"E) в 100 м от берега на глубине 2 м.

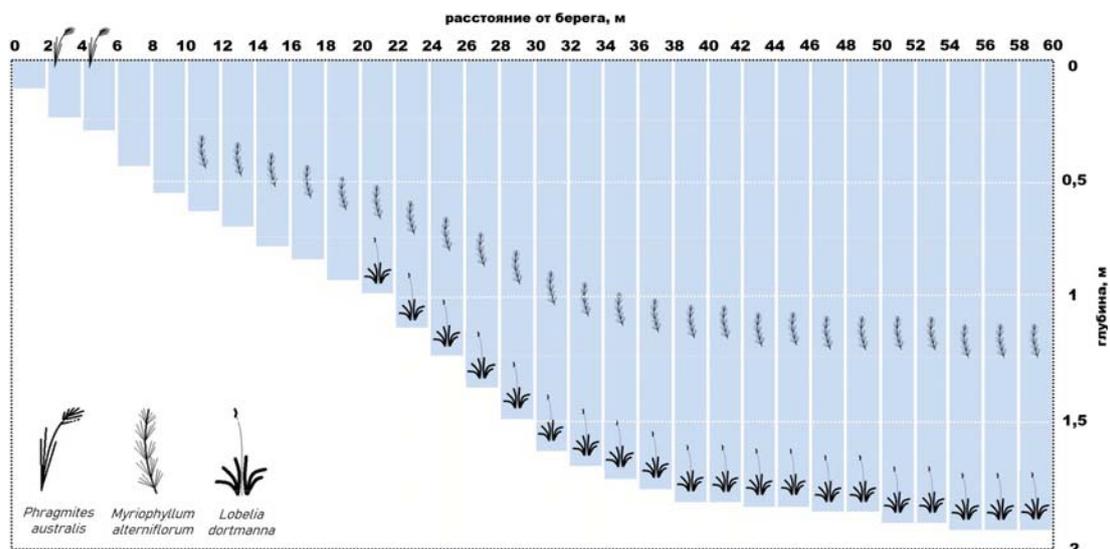


Рис. 2. Водная растительность на трансекте 1 в оз. Белом

Fig. 2. Aquatic vegetation on transect 1 in Lake Beloye

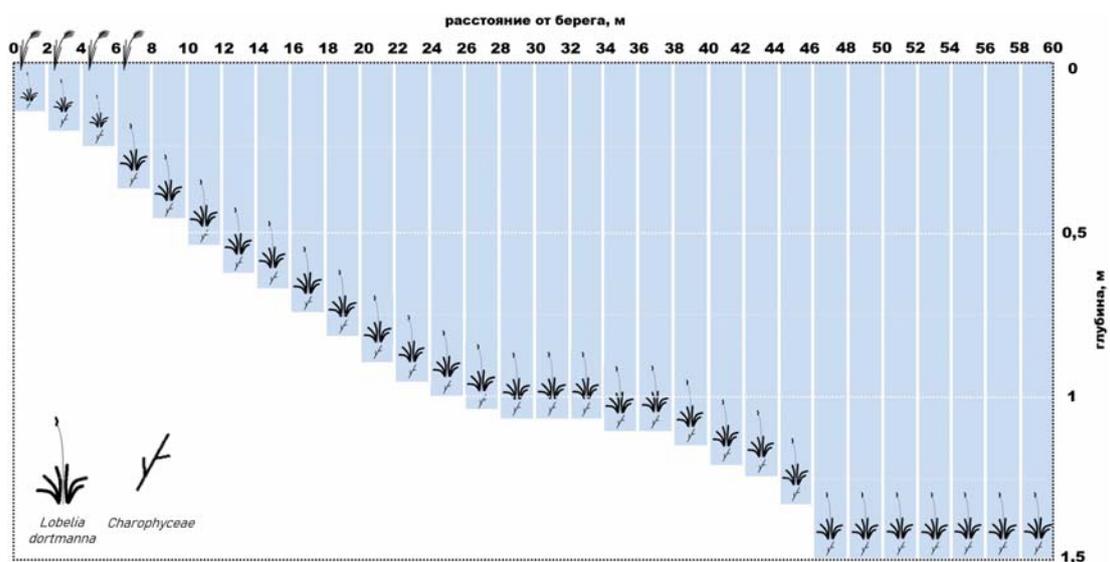


Рис. 3. Водная растительность на трансекте 2 в оз. Белом

Fig. 3. Aquatic vegetation on transect 2 in Lake Beloye

Заросли погруженных гидрофитов в оз. Белом доминируют по площади (79,6 %), превышая площадь зарослей гелофитов (20,1 %) в 4 раза (табл. 2, рис. 4). В пространственном распределении погруженных гидрофитов наблюдается зональность относительно глубины. На мелководье до глубины 1 м распространены лобелиевые сообщества с полушниками и урутью очередноцветковой. На глубине 1–2 м в лобелиевых сообществах основным субдоминантом становится прибрежница одноцветковая. Плавающие гидрофиты занимают 0,3 % в общей площади зарастания. Общая площадь зарослей высшей водной растительности занимает

90,1 га, что составляет 27,5 % от площади озера (табл. 2). В целом высокая площадь зарастания дна озера обусловлена пологим уклоном дна вдоль восточного берега и высокой прозрачностью воды, позволяющей распространение чистых ценозов лобелии и ценозов, смешанных с прибрежницей, до глубины 3,5–4 м. Общие запасы надземной растительной массы в озере в 2023 г. составляли 108,7 т (табл. 3). При этом доля гелофитов (53,3 %) превышала долю погруженных гидрофитов (46,6 %). Плавающие растения были представлены незначительно (0,2 %) в общей продукции макрофитов в оз. Белом.

Таблица 2. Вклад гелофитов, плавающих и погруженных гидрофитов в общую площадь растительного покрова и площадь оз. Белого

Table 2. Contribution of helophytes, floating-lived and submerged plants to the total plant coverage and the area of Lake Beloe

Экологическая группа Ecological group	Площадь, га Area, ha	% зарослей макрофитов % of plant cover	% площади водоема % of lake area
Гелофиты Helophytes	18,1	20,1	5,5
Плавающие гидрофиты Floating-lived plants	0,3	0,3	0,1
Погруженные гидрофиты Submerged plants	71,7	79,6	21,9
Общая площадь Total area	90,1	100,0	27,5

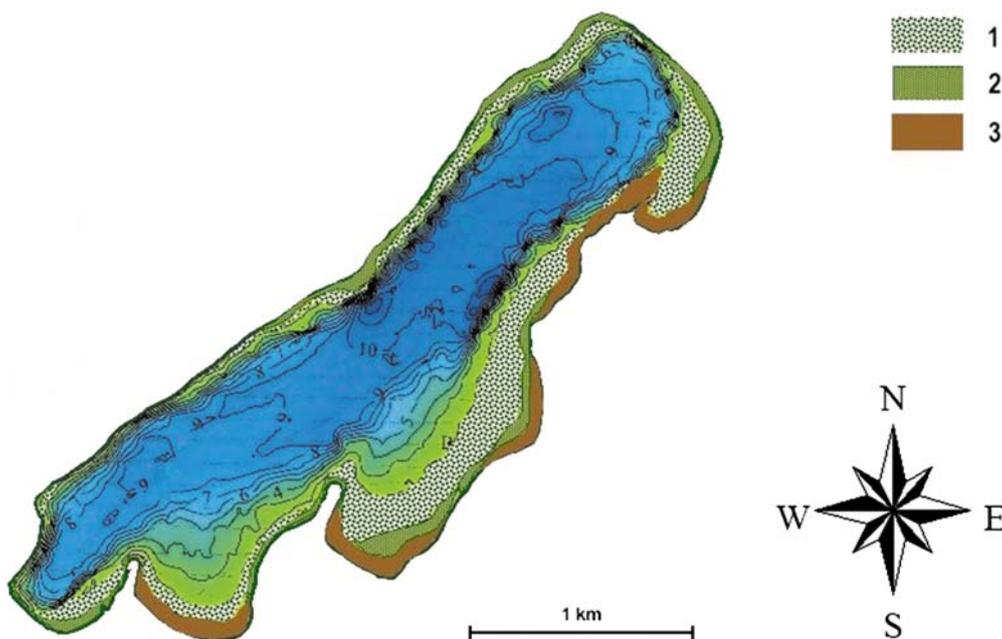


Рис. 4. Распределение сообществ макрофитов на литорали оз. Белого:

1 – *Lobelia dortmanna* с *Littorella uniflora*; 2 – *Lobelia dortmanna* с *Isoëtes echinospora*, *I. lacustris* и *Myriophyllum alterniflorum*; 3 – сообщества гелофитов с доминированием *Phragmites australis*

Fig. 4. Distribution of macrophyte assemblages on the littoral of Lake Beloe:

1 – *Lobelia dortmanna* with *Littorella uniflora*; 2 – *Lobelia dortmanna* with *Isoëtes echinospora*, *I. lacustris* and *Myriophyllum alterniflorum*; 3 – helophyte assemblages with the dominance of *Phragmites australis*

Таблица 3. Вклад гелофитов, плавающих и погруженных гидрофитов в общую надземную фитомассу оз. Белого

Table 3. Contribution of helophytes, floating-lived and submerged plants to the total aboveground biomass in Lake Beloe

Экологическая группа Ecological group	Надземная фитомасса, 10 <sup>3</sup> кг Aboveground biomass, 10 <sup>3</sup> kg
Гелофиты Helophytes	57,9
Плавающие гидрофиты Floating-lived plants	0,2
Погруженные гидрофиты Submerged plants	50,6
Всего Total	108,7

### Озеро Липовское

В составе высшей водной растительности оз. Липовского выявлено 16 видов, из которых 9 погруженных гидрофитов (*Nitella* sp., *Batrachium marinum* Fries, *Ceratophyllum demersum* L., *Elodea canadensis* Michx., *Myriophyllum alterniflorum* DC., *M. sibiricum* Kom., *Najas marina* L., *Potamogeton pectinatus* L., *P. perfoliatus* L.), один плавающий гидрофит (*Nuphar lutea* (L.) Smith), 5 гелофитов (*Alisma gramineum* Lej., *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla, *Carex acuta* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Scirpus lacustris* L.) и один гидрофит (*Ranunculus reptans* L.). Берега оз. Липовского в северной его части в районе истока протоки в Финский залив у д. Курголово зарастают плотными зарослями тростника южного. Среди зарослей тростника (шириной 3–5 м) встречаются единичные куртины камыша озерного и клубнекамыша морского (*Bolboschoenus maritimus*). Северная часть оз. Липовского характеризуется обильным развитием погруженной растительности, образующей плотный мозаичный ковер зарослей на дне. В состав погруженного яруса водной растительности входят рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus*), уруть очередноцветковая, рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus*), шелковник морской (*Batrachium marinum*) и харовые водоросли. Влиянием морских вод на этом участке озера обусловлено обильное развитие наяды морской (*Najas marina*), типичного вида солоноводных водоемов. Данный вид является редким и занесен в Красную книгу природы Ленинградской области [2018]. Еще один краснокнижный вид [Красная..., 2018] на этом участке озера – частуха злаковидная (*Alisma gramineum*), представленная подводной формой. Вдоль западного и восточного берега озера протянулась узкая полоса

(в среднем 3–5 м шириной) зарослей тростника с редкими включениями камыша озерного. Из погруженных растений вдоль берегов встречаются рдест пронзеннолистный, рдест гребенчатый, уруть сибирская (*Myriophyllum sibiricum*), наяда морская и харовые водоросли, но с намного более низкими значениями фитомассы, чем в северной части водоема. Если в северной части озера фитомасса ассоциации рдеста пронзеннолистного с рдестом гребенчатым и харовыми водорослями достигает 520 г/м<sup>2</sup>, то в центральной части ее фитомасса не превышает 100 г/м<sup>2</sup>. Соответственно, фитомасса тростника в северной части озера – 2400 г/м<sup>2</sup>, а в центральной – 580 г/м<sup>2</sup>. Растения с плавающими на воде листьями редко встречаются вдоль берегов озера и представлены изреженными ассоциациями кубышки желтой с погруженным разнотравьем.

В восточной части оз. Липовского на трансекте 1 донные отложения представлены песком (рис. 5). От уреза воды до 24 м от берега растет тростник южный. Практически сразу от уреза воды появляются первые представители погруженной растительности – уруть сибирская и роголистник погруженный. На расстоянии 4 м от берега они исчезают, сменяясь элодеей канадской и рдестом гребенчатым, которые исчезают на расстоянии 8 м от уреза воды. На расстоянии 12–14 м появляются харовые водоросли, в этой же точке отмечено присутствие урути сибирской. На расстоянии 16–18 м вновь появляются заросли рдеста гребенчатого, а на расстоянии 22–24 м – урути сибирской. На глубине 2 м (34–36 м от берега) начинается более резкий уклон дна, уруть сибирская вновь исчезает, а заросли рдеста гребенчатого сменяются зарослями рдеста пронзеннолистного. На глубине 3,5 м донные отложения сменяются илом, а водные растения исчезают. В конечной точке трансекты макрофиты не встречены.

Донные отложения на трансекте 2 в южной части оз. Липовского (рис. 6) представлены песком с редкими включениями мелких камней. На мелководье (до 6 м от уреза воды) растут тростник южный и камыш озерный, на этой же глубине появляются харовые водоросли и первые погруженные высшие водные растения – наяда морская и уруть сибирская. На расстоянии 18–20 м от берега на глубине около 2 м песок сменяется илом, на этой глубине заросли наяды морской заканчиваются и появляется рдест пронзеннолистный. К концу трансекты сохраняются обильные заросли рдеста

пронзеннолистного и харовых водорослей, уруть сибирская встречается реже.

В западной части оз. Липовского на трансекте 3 (рис. 7) донные отложения представлены песком, на глубине более 1 м встречаются редкие валуны. От уреза воды до 20 м от берега растет тростник южный. На расстоянии 6–8 м появляются харовые водоросли. На расстоянии 8–10 м появляются первые представители погруженной высшей растительности – наяда морская и рдест пронзеннолистный, а затем почти сразу (10–12 м от берега) – уруть сибирская. На глубине 2 м начинается резкий уклон дна.

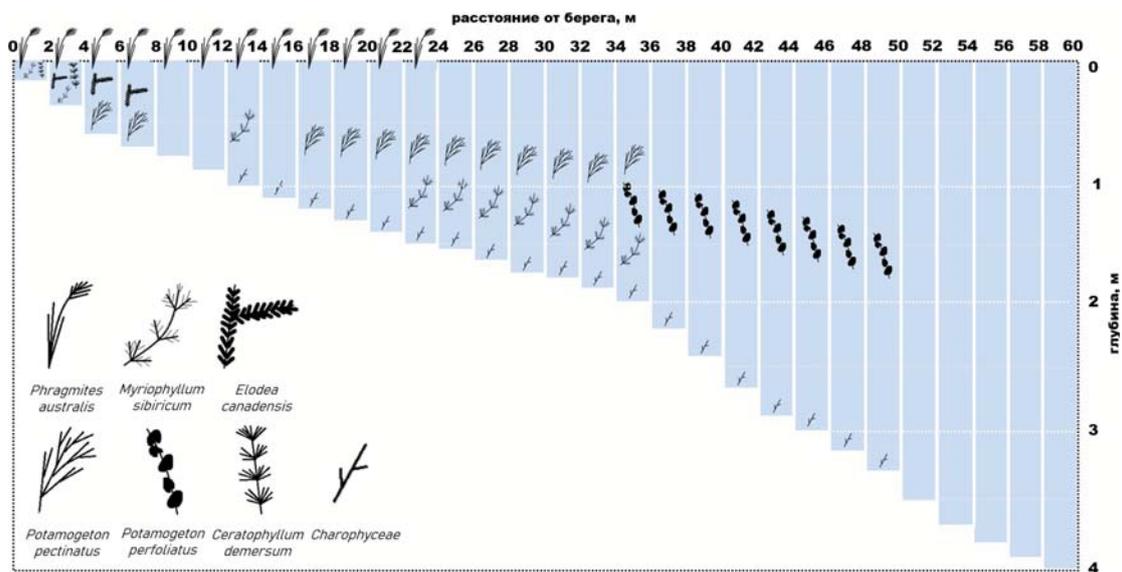


Рис. 5. Водная растительность на трансекте 1 на восточном берегу оз. Липовского

Fig. 5. Aquatic vegetation on transect 1 on the eastern coast of Lake Lipovskoe

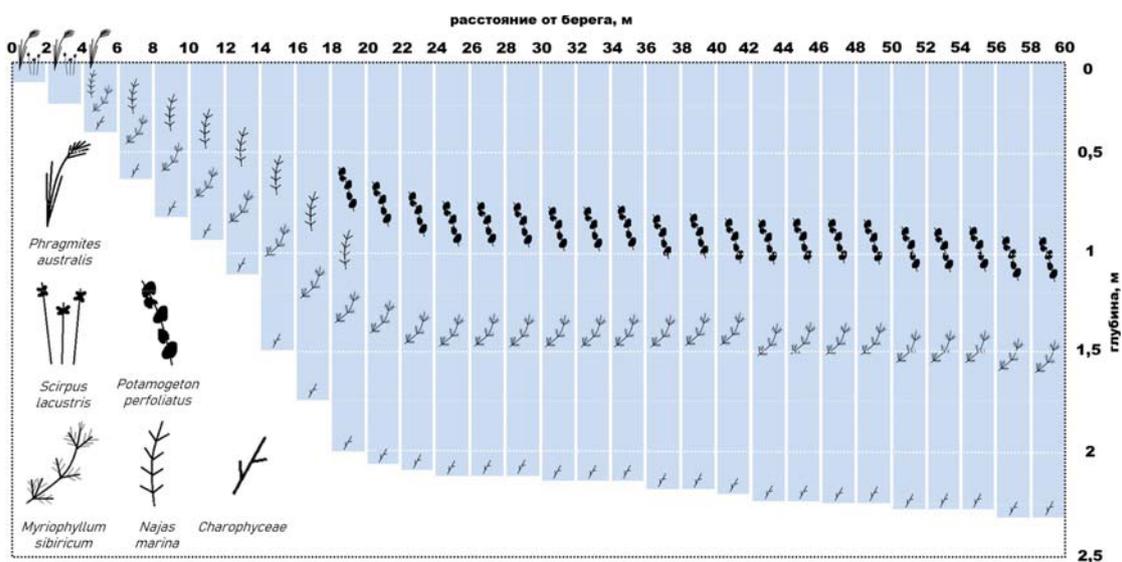


Рис. 6. Водная растительность на трансекте 2 на южном берегу оз. Липовского

Fig. 6. Aquatic vegetation on transect 2 on the southern coast of Lake Lipovskoe

На глубине 4,6 м заросли высшей водной растительности исчезают, и вместе с ними харовые водоросли. На глубине 6 м (48 м от берега) водные растения не встречались. Донные отложения в этой точке представлены алевритами.

В юго-восточной части оз. Липовского на станции 4 (с берега, без заложения трансекты) описана водная растительность на мелководье (0–4 м от берега). Здесь на глубине 0,2–0,5 м встречены редкие заросли водной формы лютика распростертого.

В оз. Липовском погруженные гидрофиты (63,1 %) превышают воздушно-водные растения (36,4 %) по площади в 1,7 раза, доминируя в зарастании озера (табл. 4, рис. 8). Плавающие гидрофиты занимают менее 1 %

в общей площади зарастания. Общая площадь зарослей высшей водной растительности составляет 73 га, или 12,9 % от площади озера (табл. 4). В целом невысокая степень зарастания дна озера обусловлена незначительной площадью литорали, пригодной для произрастания водной растительности, что вызвано сильно выраженным уклоном дна вдоль западного и восточного берега озера. Общие запасы надземной растительной массы в озере в 2023 г. насчитывали 177 т (табл. 5). При этом на долю гелофитов приходилась основная часть фитомассы – 84,2 %, на долю погруженных гидрофитов – 15,6 %, а плавающие растения составляли всего лишь 0,2 % в общей продукции макрофитов в оз. Липовском.

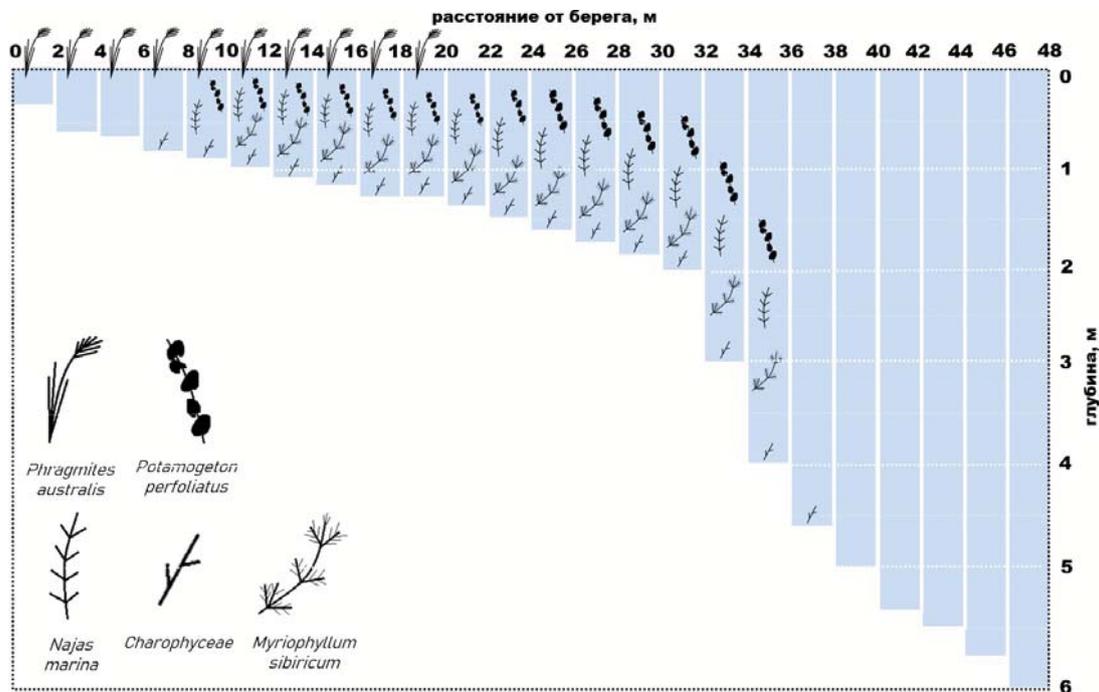


Рис. 7. Водная растительность на трансекте 3 в западной части оз. Липовского  
Fig. 7. Aquatic vegetation on transect 3 in the western part of Lake Lipovskoe

Таблица 4. Вклад гелофитов, плавающих и погруженных гидрофитов в общую площадь растительного покрова и площадь оз. Липовское

Table 4. Contribution of helophytes, floating-lived and submerged plants to the total plant coverage and the area of Lake Lipovskoe

Экологическая группа Ecological group	Площадь, га Area, ha	% зарослей макрофитов % of plant cover	% площади водоема % of lake area
Гелофиты Helophytes	26,6	36,4	4,7
Плавающие гидрофиты Floating-lived plants	0,4	0,5	0,1
Погруженные гидрофиты Submerged plants	46,0	63,1	8,1
Общая площадь Total area	73,0	100,0	12,9

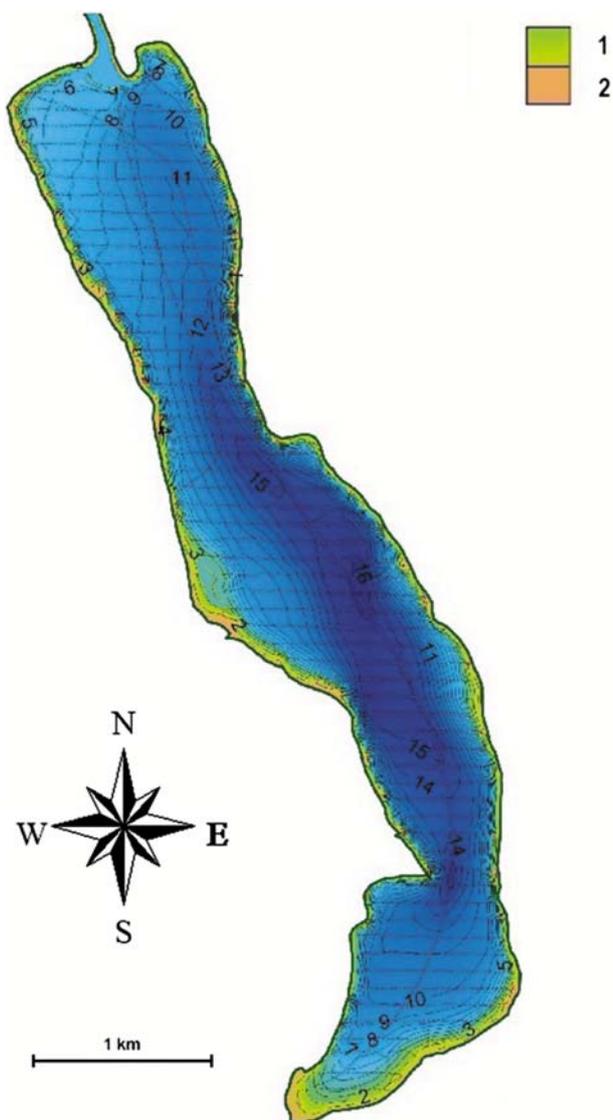


Рис. 8. Распределение экологических групп макрофитов на литорали оз. Липовского:

1 – погруженные гидрофиты; 2 – гелофиты

Fig. 8. Distribution of macrophyte ecological groups on the littoral of Lake Lipovskoe:

1 – submerged plants; 2 – helophytes

## Обсуждение результатов

Водные макрофиты благодаря видоспецифическим физиологическим требованиям адаптированы к определенным трофическим условиям [Seddon, 1972] и поэтому могут использоваться в качестве организмов – индикаторов уровня эвтрофирования озерных систем [Penning et al., 2008]. Доминирование в зарастании оз. Белого лобелиевых сообществ, включающих помимо *Lobelia dortmanna* и другие виды – индикаторы чистых условий среды, такие как *Isoetes echinospora*, *I. lacustris*, *Littorella uniflora* и *Myriophyllum alterniflorum* [Penning et al., 2008], указывает на олиготрофный статус водоема. Озеро Липовское по видовому составу макрофитов характеризуется как мезотрофно-эвтрофный водоем. Широкое распространение в озере *Potamogeton pectinatus* и *Najas marina*, толерантных к эвтрофированию [Penning et al., 2008], а также *P. perfoliatus*, индикатора мезотрофных условий [Toivonen, Huttunen, 1995], говорит о повышенном трофическом статусе водоема. Массовое распространение *P. pectinatus* в озере также объясняется тем, что этот вид имеет физиологический оптимум в верхней части градиента минерализации озерных вод [Heegaard et al., 2001; Свириденко и др., 2016].

Трофические условия в водоемах также влияют на продуктивность растительных ассоциаций [Папченков, 2001]. Известно, что продуктивность зарослей тростника в озерах зависит от уровня эвтрофирования [Ostendorp et al., 2001; Русанов, 2011]. Значения фитомассы зарослей тростника в оз. Липовском варьировали от эвтрофных показателей (2400 г/м<sup>2</sup>) в северной части в районе д. Курголово до мезотрофных (580 г/м<sup>2</sup>) в центральной части водоема. В оз. Белом продуктивность зарослей тростника не превышала 320 г/м<sup>2</sup>, что соответствовало низкому трофическому статусу водоема.

Таблица 5. Вклад гелофитов, плавающих и погруженных гидрофитов в общую надземную фитомассу оз. Липовского

Table 5. Contribution of helophytes, floating-lived and submerged plants to the total aboveground biomass in Lake Lipovskoe

Экологическая группа Ecological group	Надземная фитомасса, 10 <sup>3</sup> кг Aboveground biomass, 10 <sup>3</sup> kg
Гелофиты Helophytes	149,0
Плавающие гидрофиты Floating-lived plants	0,4
Погруженные гидрофиты Submerged plants	27,6
Всего Total	177,0

Морфометрические параметры озер, такие как уклон дна, оказывают влияние на биомассу и видовой состав сообществ водных растений посредством изменения условий освещенности и интенсивности волнового воздействия [Duarte, Kalff, 1986; He et al., 2019]. Более пологий уклон дна в оз. Белом приводит к более спокойным гидродинамическим условиям на литорали озера по сравнению с крутым уклоном дна на литорали оз. Липовского. Кроме того, в оз. Белом значительно более прозрачная вода (6 м по диску Секки), чем в оз. Липовском (всего 2 м). Высокая прозрачность воды в оз. Белом – результат низкой продуктивности фитопланктона, о чем свидетельствуют низкие концентрации хлорофилла *a* [Станиславская и др., 2021]. Оба этих фактора – морфометрический и трофический – вместе способствуют более интенсивному развитию и, как следствие, более выраженному доминированию зарослей погруженных растений в оз. Белом по сравнению с оз. Липовским.

При классификации озер по видовому составу макрофитов и индикаторам трофности равнинные неглубокие ( $\leq 15$  м) озера с преобладанием *Lobelia dortmanna* принято выделять в отдельную группу лобелиевых озер [G.-Tóth et al., 2008]. Как показали исследования растительного покрова лобелиевых озер в Тверской [Петушкова и др., 2008; Марков, 2017] и Вологодской [Филиппов и др., 2016] области, лобелия образует плотные лобелиево-полушниковые и чистые лобелиевые ценозы, иногда произрастающие в зарослях тростника. В оз. Белом розетки лобелии густо покрывают участки дна, свободные от тростника, и встречаются в изреженных тростниковых зарослях, но с меньшими показателями обилия. Диапазон глубин, на которых произрастает лобелия, для озер Тверской области составлял 0,2–1,4 м при оптимальной глубине произрастания 0,5–0,8 м [Петушкова и др., 2008; Марков, 2017]. В озерах Вологодской области лобелия в основном встречается на мелководье (0,1–0,8 м), но в отдельных озерах она отмечалась на глубине 2,8–2,9 и даже 3,5 м [Филиппов и др., 2016]. Благодаря высокой прозрачности воды в оз. Белом оптимальная глубина произрастания чистых ценозов лобелии составляет 1,5–2,0 м, при этом максимальная глубина ее распространения достигает 4 м.

В лобелиевых озерах, и в оз. Белом в том числе, совместно с лобелией произрастают и другие реликтовые виды растений, такие как *Isoetes* spp., *Littorella uniflora*, *Subularia aquatica* L., *Eleocharis acicularis* и *Ranunculus reptans*, которые принадлежат к группе изоэтид

[Toivonen, Huttunen, 1995; Vestergaard, Sand-Jensen, 2000]. Изоэтиды – экобиоморфологическая группа розеточных придонных растений, вобравшая в себя много представителей из разных семейств цветковых, которых объединяет наличие развитой системы воздушных лакун в листьях и корнях [Марков, Грушенков, 2023]. Благодаря более высокой газопроницаемости поверхности корней по сравнению с поверхностью листьев и быстрому транспорту газа внутри тканей изоэтид большая часть  $\text{CO}_2$  для фотосинтеза растений поступает из более богатого источника  $\text{CO}_2$  в донных отложениях, а не из озерной воды [Søndergaard, Sand-Jensen, 1979]. Способность эффективно усваивать  $\text{CO}_2$  из донных отложений наряду с адаптацией к условиям дефицита элементов минерального питания обуславливает широкое распространение изоэтид в бедных углеродом олиготрофных озерах в регионах Северной Европы и Северной Америки [Hutchinson, 1975]. В то же время вследствие узкой экологической приуроченности к олиготрофным условиям изоэтиды крайне уязвимы к ацидификации и эвтрофированию озер [Smolders et al., 2002]. Ограниченное распространение изоэтид в озерах с повышенной трофностью, по-видимому, связано с вытеснением их в результате интенсивной конкуренции за свет и пространство со стороны макрофитов, толерантных к эвтрофированию и способных ассимилировать бикарбонат для нужд фотосинтеза [Vestergaard, Sand-Jensen, 2000; Ronowski et al., 2020].

В солоноватом оз. Липовском произрастают как обычные пресноводные виды, так и виды, типичные для солоноводных водоемов. Исследование, проведенное на озерах лесостепной и степной зоны Западной Сибири [Зарубина, Дурникин, 2005], охватывающее широкий диапазон минерализации от олигогалинных (2,5–5,0 г/л) и мезогалинных (5,0–18,0 г/л) до гипергалинных ( $> 40$  г/л) водоемов, показало постепенное замещение пресноводного комплекса макрофитов на солоновато-водный и далее на комплекс типичных галофилов вдоль градиента увеличения солености воды. При этом наибольшее видовое разнообразие отмечено в солоноватоводном комплексе эврибионтов, которые широко представлены в озерах с минерализацией воды от 1,5 до 10,0 г/л. Это согласуется с нашими данными в олигогалинном оз. Липовском, где доминируют гидрофиты *Potamogeton perfoliatus* и *P. pectinatus*, принадлежащие к эврибионтным видам [Зарубина, Дурникин, 2005; Свириденко и др., 2016]. Напротив, типичный галофил *Najas marina* находится на подчиненных ролях в формировании фитоценозов оз. Липовского.

Это согласуется с данными других исследователей [Ефремов, Свириденко, 2016], которые отмечали, что в олигогалинных условиях *N. marina* входит в состав растительных группировок с *P. pectinatus* в качестве ассектатора.

## Заключение

Исследование озер Белого и Липовского на Кургальском полуострове показало, что морфометрические особенности литорали и трофический статус оказывают определяющее влияние на формирование состава и структуры их растительного покрова. Спокойный гидродинамический режим благодаря пологому уклону дна и высокая прозрачность воды из-за низкого уровня развития фитопланктона способствуют более выраженному доминированию погруженных растений в оз. Белом по сравнению с оз. Липовским. Доминирование лобелиевых сообществ в оз. Белом соответствует олиготрофным условиям в водоеме. Широкое распространение в оз. Липовском видов – показателей эвтрофных (*Potamogeton pectinatus*, *Najas marina*) и мезотрофных (*Potamogeton perfoliatus*) условий указывает на мезотрофно-эвтрофный статус водоема. Учитывая уязвимость реликтовых растительных сообществ лобелиевых озер к антропогенному воздействию и увеличение рекреационной нагрузки на водоемах Кургальского полуострова, представляется необходимым повысить природоохранный статус оз. Белого с регионального до федерального уровня, а также организовать проведение в нем экологического мониторинга.

## Литература

Водно-болотные угодья международного значения // Водно-болотные угодья России. М.: Wetlands International Publ., 1998. Т. 1. 256 с.

Глазкова Е. А., Гимельбрант Д. Е., Степанчикова И. С., Доронина А. Ю., Гинзбург Э. Г., Потемкин А. Д., Дорошина Г. Я., Андреев М. П. Ценные ботанические объекты заказника «Кургальский» (Ленинградская область). 1. Редкие и охраняемые виды // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 8. С. 37–60. doi: 10.17076/bg767

Глазкова Е. А., Ликсакова Н. С., Доронина А. Ю., Гимельбрант Д. Е., Степанчикова И. С., Гинзбург Э. Г., Потемкин А. Д. Ценные ботанические объекты заказника «Кургальский» (Ленинградская область). 3. Приморские, водные и прибрежно-водные биотопы. Заказник как ключевая ботаническая территория // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 1. С. 5–16. doi: 10.17076/bg825

Зарубина Е. Ю., Дурникин Д. А. Флора соленых озер Кулундинской равнины (юг Западной Сиби-

ри) // Сибирский экологический журнал. 2005. № 2. С. 341–351.

Ефремов А. Н., Свириденко Б. Ф. О распространении редких гидрофитов в Омской области // Ботанический журнал. 2016. № 101(8). С. 923–927. doi: 10.1134/S0006813616080044

Катанская В. М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения. Л.: Наука, 1981. 187 с.

Красная книга Ленинградской области. Объекты растительного мира / Гл. ред. Д. В. Гельтман. СПб.: Марафон, 2018. 848 с.

Марков М. В. К изучению полушниковых олиготрофных озер Тверской области: фотосинтезирующая биота как индикатор их трофического статуса // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2017. Vol. 2(1). P. 1–19. doi: 10.21685/2500-0578-2017-1-4

Марков М. В., Грушенков Д. О. К феномену паразитической биоморфологической конвергенции в группе экобиоморф «изоэтиды» // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2023. № 101(104). С. 30–38. doi: 10.47021/0320-3557-2023-29-37

Папченков В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. 200 с.

Петушкова Т. П., Дементьева С. М., Сорокин А. С. К вопросу изучения *Lobelia dortmanna* L. в Тверской области // Вестник Тверского государственного университета. Сер. Биология и экология. 2008. № 10. С. 167–170.

Русанов А. Г. Пространственное распределение высшей водной растительности Ладожского озера в зависимости от природных и антропогенных факторов // Литоральная зона Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 68–101.

Свириденко Б. Ф., Мурашко Ю. А., Свириденко Т. В., Ефремов А. Н. Толерантность гидромакрофитов к активной реакции, минерализации и жесткости воды в природных и техногенных водных объектах Западно-Сибирской равнины // Вестник Нижневолжского государственного университета. 2016. № 2. С. 8–17.

Станиславская Е. В., Афанасьева А. Л., Павлова О. А. Альгофлора озер заказника «Кургальский» (Ленинградская область) // Поволжский экологический журнал. 2021. № 3. С. 335–347. doi: 10.35885/1684-7318-2021-3-335-347

Филиппов Д. А., Бобров Ю. А., Чхобадзе А. Б., Левашов А. Н. *Lobelia dortmanna* (Lobeliaceae) в Вологодской области // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2016. № 1. С. 84–99.

Duarte C. M., Kalff J. Littoral slope as a predictor of the maximum biomass of submerged macrophyte communities // Limnol. Oceanogr. 1986. Vol. 31(5). P. 1072–1080.

G.-Tóth L., Poikane S., Penning W. E., Free G., Mäemets H., Kolada A., Hanganu J. First steps in the Central-Baltic intercalibration exercise on lake macrophytes: where do we start? // Aquat. Ecol. 2008. Vol. 42(2). P. 265–275. doi: 10.1007/s10452-008-9184-9

Hutchinson G. E. A treatise on limnology: limnological botany. New York: John Wiley and Sons, 1975. 660 p.

He L., Zhu T., Wu Y., Li W., Zhang H., Zhang X., Cao T., Ni L., Hilt S. Littoral slope, water depth and alternative response strategies to light attenuation shape the distribution of submerged macrophytes in a mesotrophic lake // *Front. Plant Sci.* 2019. Vol. 10. P. 169. doi: 10.3389/fpls.2019.00169

Heegaard E., Birks H. H., Gibson C. E., Smith S. J., Wolfe-Murphy S. Species-environmental relationships of aquatic macrophytes in Northern Ireland // *Aquat. Bot.* 2001. Vol. 70. P. 175–223. doi: 10.1016/S0304-3770(01)00161-9

Kolada A., Seppo H., Kanninen A., Sondergaard M., Dudley B., Noges P., Ott I., Ecke F., Mjelde M., Bertrin V., Davidson Th., Duel H. Deliverable D3.2-1: Overview and comparison of macrophyte survey methods used in European countries and a proposal of harmonized common sampling protocol to be used for WISER uncertainty exercise including a relevant common species list. 2009. URL: <http://www.wiser.eu/download/D3.2-1.pdf> (дата обращения: 15.12.2023).

Ostendorp W., Tiedge E., Hille S. Effect of eutrophication on culm architecture of lakeshore *Phragmites* reeds // *Aquat. Bot.* 2001. Vol. 69. P. 177–193.

Penning W. E., Mjelde M., Dudley B., Hellsten S., Hanganu J., Kolada A., van den Berg M., Poikane S., Phillips G., Willby N., Ecke F. Classifying aquatic macrophytes as indicators of eutrophication in European lakes // *Aquat. Ecol.* 2008. Vol. 42. P. 237–251. doi: 10.1007/s10452-008-9182-y

Ronowski R. P., Banas K., Merdalski M., Szmeja J. Plant replacement trend in soft-water lakes with isoetids // *Oceanol. Hydrobiol. Stud.* 2020. Vol. 49(2). P. 157–167. doi: 10.1515/ohs-2020-0015

Seddon B. Aquatic macrophytes as limnological indicators // *Freshwat. Biol.* 1972. Vol. 2. P. 107–130.

Søndergaard M., Sand-Jensen K. Carbon uptake by leaves and roots of *Littorella uniflora* (L.) Aschers. // *Aquat. Bot.* 1979. Vol. 6. P. 1–12. doi: 10.1007/BF00320820

Smolders A. J. P., Lucassen E. C. H. E., Roelofs J. G. M. The isoetid environment: biogeochemistry and threats // *Aquat. Bot.* 2002. Vol. 73. P. 325–350. doi: 10.1016/S0304-3770(02)00029-3

Toivonen H., Huttunen P. Aquatic macrophytes and ecological gradient in 57 small lakes in southern Finland // *Aquat. Bot.* 1995. Vol. 51. P. 197–221. doi: 10.1016/0304-3770(95)00458-C

Vestergaard O., Sand-Jensen K. Alkalinity and trophic state regulate aquatic plant distribution in Danish lakes // *Aquat. Bot.* 2000. Vol. 67. P. 85–107. doi: 10.1016/S0304-3770(00)00086-3

## References

Duarte C. M., Kalff J. Littoral slope as a predictor of the maximum biomass of submerged macrophyte communities. *Limnol. Oceanogr.* 1986;31(5):1072–1080.

Efremov A. N., Sviridenko B. F. On distribution of rare hydrophytes in the Omsk Region. *Bot. Zhurn.* 2016;101(8):923–927. doi: 10.1134/S0006813616080044 (In Russ.)

Gel'tman D. V. (ed.). The Red Data Book of the Leningrad Region: Plants. St. Petersburg: Marafon; 2018. 848 p. (In Russ.)

Glazkova E. A., Himelbrant D. E., Stepanchikova I. S., Doronina A. Yu., Ginzburg E. G., Potemkin A. D., Doroshina G. Ya., Andreev M. P. Valuable botanical objects of the Kurgalsky Nature Reserve (Leningrad Region). 1. Rare and protected species. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;8:37–60. doi: 10.17076/bg767 (In Russ.)

Glazkova E. A., Liksakova N. S., Doronina A. Yu., Himelbrant D. E., Stepanchikova I. S., Ginzburg E. G., Potemkin A. D. Valuable botanical objects of the Kurgalsky Nature Reserve (Leningrad Region). 3. Coastal, aquatic and semiaquatic biotopes of high conservation value. The Kurgalsky Reserve as an important plant area. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2020; 1:5–16. doi: 10.17076/bg825 (In Russ.)

G.-Tóth L., Poikane S., Penning W. E., Free G., Mäemets H., Kolada A., Hanganu J. First steps in the Central-Baltic intercalibration exercise on lake macrophytes: where do we start? *Aquat. Ecol.* 2008;42(2):265–275. doi: 10.1007/s10452-008-9184-9

He L., Zhu T., Wu Y., Li W., Zhang H., Zhang X., Cao T., Ni L., Hilt S. Littoral slope, water depth and alternative response strategies to light attenuation shape the distribution of submerged macrophytes in a mesotrophic lake. *Front. Plant Sci.* 2019;10:169. doi: 10.3389/fpls.2019.00169

Heegaard E., Birks H. H., Gibson C. E., Smith S. J., Wolfe-Murphy S. Species-environmental relationships of aquatic macrophytes in Northern Ireland. *Aquat. Bot.* 2001;70:175–223. doi: 10.1016/S0304-3770(01)00161-9

Hutchinson G. E. A treatise on limnology: limnological botany. New York: John Wiley and Sons; 1975. 660 p.

Katanskaya V. M. Higher aquatic vegetation of continental water bodies in the USSR. Methods of study. Leningrad: Nauka; 1981. 187 p. (In Russ.)

Kolada A., Seppo H., Kanninen A., Sondergaard M., Dudley B., Noges P., Ott I., Ecke F., Mjelde M., Bertrin V., Davidson Th., Duel H. Deliverable D3.2-1: Overview and comparison of macrophyte survey methods used in European countries and a proposal of harmonized common sampling protocol to be used for WISER uncertainty exercise including a relevant common species list. 2009. URL: <http://www.wiser.eu/download/D3.2-1.pdf> (accessed: 15.12.2023).

Markov M. V. Research of the isoetid oligotrophic lakes in the Tver Region: photosynthetic biota as their trophic state indicator. *Russian Journal of Ecosystem Ecology.* 2017;2(1):1–19. doi: 10.21685/2500-0578-2017-1-4 (In Russ.)

Markov M. V., Grushenkov D. O. On the striking biomorphological convergency within group ecobiomorph 'isoetids'. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod im. I. D. Papanina RAN = Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS.* 2023;101(104):30–38. doi: 10.47021/0320-3557-2023-29-37 (In Russ.)

Ostendorp W., Tiedge E., Hille S. Effect of eutrophication on culm architecture of lakeshore *Phragmites* reeds. *Aquat. Bot.* 2001;69:177–193.

Papchenkov V. G. Vegetation cover of waterbodies and watercourses of the Middle Volga region. Yaroslavl: CMP MUBiNT; 2001. 200 p. (In Russ.)

Penning W. E., Mjelde M., Dudley B., Hellsten S., Hanganu J., Kolada A., van den Berg M., Poikane S., Phillips G., Willby N., Ecke F. Classifying aquatic macrophytes as indicators of eutrophication in European lakes. *Aquat. Ecol.* 2008;42:237–251. doi: 10.1007/s10452-008-9182-y

Petushkova T. P., Dementieva S. M., Sorokin A. S. *Lobelia dortmanna* L. in the Tver Region. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Biologiya i ekologiya = Vestnik of Tver State University. Series Biology and Ecology.* 2008;10:167–170. (In Russ.)

Philippov D. A., Bobroff Yu. A., Czobadze A. B., Levashov A. N. *Lobelia dortmanna* (Lobeliaceae) in the Vologda Region. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 3. Biologiya = Vestnik of St. Petersburg University. Series 3. Biology.* 2016;1:84–99. (In Russ.)

Ronowski R. P., Banas K., Merdalski M., Szmeja J. Plant replacement trend in soft-water lakes with isoetids. *Oceanological and Hydrobiological Studies.* 2020;49(2):157–167. doi: 10.1515/ohs-2020-0015

Rusanov A. G. Spatial distribution of higher aquatic vegetation of Lake Ladoga in relation to natural and anthropogenic factors. Littoral zone of Lake Ladoga. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2011. P. 68–101. (In Russ.)

Seddon B. Aquatic macrophytes as limnological indicators. *Freshwat. Biol.* 1972;2:107–130.

Smolders A. J. P., Lucassen E. C. H. E., Roelofs J. G. M. The isoetid environment: biogeochemistry and threats. *Aquat. Bot.* 2002;73:325–350. doi: 10.1016/s0304-3770(02)00029-3

Søndergaard M., Sand-Jensen K. Carbon uptake by leaves and roots of *Littorella uniflora* (L.) Aschers. *Aquat. Bot.* 1979;6:1–12. doi: 10.1007/BF00320820

Stanislavskaya E. V., Afanasieva A. L., Pavlova O. A. Algot flora of lakes in the Kurgalsky Nature reserve (Leningrad Region). *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal = Povolzhskiy Journal of Ecology.* 2021;3:335–347. doi: 10.35885/1684-7318-2021-3-335-347 (In Russ.)

Sviridenko B. F., Murashko Y. A., Sviridenko T. V., Efremov A. N. Tolerance of hydromacrophytes to active reaction, mineralization and water hardness in natural and man-made water bodies of the West Siberian Plain. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Nizhnevartovsk State University.* 2016;(2):8–17. (In Russ.)

Toivonen H., Huttunen P. Aquatic macrophytes and ecological gradient in 57 small lakes in southern Finland. *Aquat. Bot.* 1995;51:197–221. doi: 10.1016/0304-3770(95)00458-C

Vestergaard O., Sand-Jensen K. Alkalinity and trophic state regulate aquatic plant distribution in Danish lakes. *Aquat. Bot.* 2000;67:85–107. doi: 10.1016/S0304-3770(00)00086-3

Wetlands of international importance. *Wetlands in Russia.* Vol. 1. Moscow: Wetlands International Publ.; 1998. 256 p. (In Russ.)

Zarubina E. Yu., Durnikin D. A. Flora of the salted lakes of the Kulunda Plain (South of West Siberia). *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Contemporary Problems of Ecology.* 2005;2:341–351. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 23.12.2023; принята к публикации / accepted: 27.02.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Русанов Александр Геннадьевич

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: rusanov@limno.ru

### Газизова Татьяна Юрьевна

младший научный сотрудник

e-mail: tssml@bk.ru

### Лапенков Артем Евгеньевич

младший научный сотрудник

e-mail: lapa13art@gmail.com

### Сапелко Татьяна Валентиновна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: tsapelko@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Rusanov, Alexander

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

### Gazizova, Tatyana

Junior Researcher

### Lapenkov, Artem

Junior Researcher

### Sapelko, Tatyana

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

УДК 556.555.4

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОЙ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕЧЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРУПНЫХ ВНУТРЕННИХ АКВАТОРИЙ

**В. В. Гузиватый\***, **М. А. Науменко**

Институт озераведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), \*guzivaty@gmail.com

Метод максимальной кросс-корреляции (МСС) впервые был использован для Ладожского озера в 2016 г. Метод позволяет оценить динамику вод в мезо- и синоптических масштабах на поверхности морей и крупных озер с использованием последовательных спутниковых инфракрасных снимков с пространственным разрешением 1×1 км. Обсуждаются методические аспекты применения и ограничения метода МСС для крупных акваторий. Предложенные для Ладожского озера процедуры выбора наиболее благоприятных метеорологических условий и анализа космической информации показали свою эффективность при применении метода МСС для акваторий с площадями от 9,7 до 422 тыс. км<sup>2</sup>. Методом максимальной кросс-корреляции проведены оценки поверхностных течений для крупных внутренних акваторий европейской части Российской Федерации, включающих Ладожское, Онежское озеро, Белое, Балтийское, Черное и Каспийское море для конкретных ветровых ситуаций в период открытой воды. Выявлен период в сезонном аспекте, для которого метод МСС для указанных акваторий наиболее результативен, показана его перспективность в условиях отсутствия *in situ* измерений течений.

Ключевые слова: течения на поверхности морей и крупных озер; метод МСС; Ладожское озеро; Онежское озеро; Белое, Балтийское, Черное и Каспийское море

Для цитирования: Гузиватый В. В., Науменко М. А. Применение метода максимальной кросс-корреляции для оценки течений на поверхности крупных внутренних акваторий // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 65–78. doi: 10.17076/lim1854

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

## V. V. Guzivaty\*, M. A. Naumenko. APPLICATION OF THE MAXIMUM CROSS-CORRELATION METHOD FOR ESTIMATION OF SURFACE CURRENTS OF LARGE INLAND WATER AREAS

*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), \*guzivaty@gmail.com*

The maximum cross-correlation (MCC) method was first used for Lake Ladoga in 2016. The method enables the assessment of water dynamics at meso- and synoptic scales on the surface of seas and large lakes using sequential satellite infrared images with a spatial resolution of 1×1 km. The article discusses methodological aspects of application and limitations of the MCC method for large water areas. The procedures of selecting the most favorable meteorological conditions and space data analysis proposed for Lake Ladoga have shown their effectiveness when applying the MCC method for areas from 9.7 to 422 thous. km<sup>2</sup>. The maximum cross-correlation method was used to estimate surface currents for large inland water areas of the European part of the Russian Federation, including Lake Ladoga, Lake Onego, the White, Baltic, Black and Caspian Seas for specific wind situations during the open water period. The period in the seasonal aspect, for which the MCC method for these water areas is the most effective, is revealed, and its prospects in the absence of *in situ* measurements of currents are shown.

**Keywords:** currents on the surface of seas and large lakes; MCC method; Lake Ladoga; Lake Onego; White Sea; Baltic Sea; Black and Caspian Seas

**For citation:** Guzivaty V. V., Naumenko M. A. Application of the maximum cross-correlation method for estimation of surface currents of large inland water areas. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 65–78. doi: 10.17076/lim1854

**Funding.** Financial support of the research was provided from the federal budget for the fulfillment of the state task FFZF-2024-0001 “Ecosystems of Lake Ladoga, water bodies of its basin and adjacent territories under the influence of natural and anthropogenic factors against the background of climatic changes”.

### Введение

Течения в озерах, морях и океанах вне зависимости от размера акватории определяют процессы тепло- и массопереноса, распределение химических элементов и гидробионтов. Крупномасштабные измерения скорости и направления течений на поверхности морей и крупных озер могут быть проведены либо с использованием специализированных полигонов, состоящих из буйковых станций, либо с использованием автономных дрейфующих буев со спутниковыми системами определения их координат и передачи данных. Эти измерения связаны со значительными затратами и технически крайне сложны. Пространственно-временные вариации течений на поверхности Ладожского озера, крупнейшего в Европе, играют важную роль в формировании качества питьевой воды для Санкт-Петербурга и прилегающих территорий. Лишь долговременные измерения течений позволяют представить крупномасштабную циркуляцию в озере и дать количественную оценку системы течений, меняющейся в зависимости от сезона и ветровой ситуации. Институтом озероведения РАН в 60–80-е годы

прошлого века проводились разовые измерения течений в Ладожском озере с заякоренных судов [Малинина и др., 1984] и непрерывные регистрации с использованием буйковых станций [Филатов, 1991]. Эти измерения до сих пор повторить или существенно дополнить так и не удалось. В настоящее время мезомасштабная и синоптическая циркуляция вод Ладожского озера недостаточно изучена из-за отсутствия регулярных гидрологических работ. Мониторинг скорости и направления течений в Ладожском озере является необходимым звеном для верификации двух- и трехмерных термогидродинамических моделей крупных озер [Охлопкова, 1966; Андреев, Воробьева, 1986; Астраханцев и др., 1988; Филатов, 1991; Диагноз..., 2020].

Современные методы дистанционного зондирования позволяют рассчитать геострофические течения на поверхности морей и океанов по альтиметрическим измерениям с помощью радаров X-диапазона [Wunsch, 1992], а также с использованием данных с радаров с синтезированной апертурой (SAR) [Romeiser et al., 2010]. Для оценки системы поверхностных течений на значительных площадях достаточно перспективен метод MCC, разработанный

В. Эмери в 1986 году [Emery et al., 1986] на основе теории распознавания образов, использующий последовательные ИК-съемки акваторий океанов и морей, которые поступают намного чаще, чем данные с альтиметров или SAR. Метод разработан для обнаружения поверхностных потоков, связанных с видимыми движениями структурных особенностей горизонтальных температурных градиентов. Он получил достаточно широкое распространение и считается фактически стандартом, с которым сверяют скорости и направления течения, полученные другими методами, в том числе и модельными [Kelly, Strub, 1992]. Их использование позволяет изучать обширные районы, затрачивая минимальные ресурсы [Алексанин и др., 2013]. В нашей стране имеются единичные публикации по этой теме [Afanasyev et al., 2002]. В работе [Zavialov et al., 2002] метод был модифицирован, и его применили для расчета поверхностных течений в Черном море. Метод МСС в основном применялся в открытом океане и в нескольких случаях в небольших бассейнах, таких как Адриатическое море [Notarstefano et al., 2008], Черное море [Afanasyev et al., 2002], Балтийское море [Gade et al., 2012] и озеро Тахо [Steissberg et al., 2005]. Для верификации метода МСС использовали численные квази-геострофические или чисто адвективные двумерные модели [Kamachi, 1989; Emery et al., 1992], хотя методика МСС широко применяется во всем мире, в нашей стране этот метод используется достаточно редко.

Цель настоящей статьи заключается в представлении и обсуждении особенностей использования метода МСС для крупных внутренних акваторий европейской части Российской Федерации, а именно для Белого, Балтийского, Черного и Каспийского морей, а также для Онежского и Ладожского озер. Эти акватории отличаются друг от друга как размерами и широтным расположением, так и пространственно-временной изменчивостью термодинамических процессов. Для конкретных ветровых ситуаций и периодов времени около 4 часов представлены схемы вычисленных поверхностных течений в указанных водоемах.

### **Методические особенности применения метода МСС для внутренних водоемов и исходные данные**

Метод МСС был применен для оценки течений на поверхности Ладожского озера, небольшого по сравнению с океанами и морскими акваториями водоема (рис. 1, табл. 1), в 2016 году [Гузиватый, Науменко, 2016].

Несомненно, это обстоятельство потребовало проведения дополнительных методических разработок по его адаптации и верификации для оценки течений к условиям озера [Гузиватый и др., 2020].

Исходными данными для расчетов методом МСС послужили серии из нескольких последовательных ИК-спутниковых изображений акватории (табл. 2) Ладожского озера с пространственным разрешением около километра, полученных сканером MODIS с временным интервалом в несколько часов. Сканер установлен на спутниках Aqua и Terra [NASA...].

На предварительном этапе анализа представляет определенную трудность найти два последовательных спутниковых снимка с небольшим промежутком времени между ними, что связано с параметрами орбиты спутников и облачным покровом над водным объектом, искажающими термические характеристики поверхности воды. Ладожское озеро, в силу своего расположения и размеров, достаточно непродолжительные периоды бывает полностью свободно от облачности или дымки, что вносит искажения в распределение изотерм поверхностного слоя воды. При выборе пар последовательных космических снимков необходимо учитывать время суток, метеорологические условия и разницу во времени между снимками, предполагая, что за этот временной период термическая структура озера изменяется только под действием адвективного смещения изотерм. Известно, что достаточно крупномасштабные изменения термической структуры озера летом могут происходить за небольшой отрезок времени, составляющий несколько часов [Филатов, 1991].

В дневное время в штилевую и безоблачную погоду над Ладожским озером происходит интенсивный прогрев тонкого поверхностного слоя воды толщиной в несколько миллиметров, температура которого может значительно отличаться от температуры нижележащего слоя. Например, такие условия наблюдаются в локальном районе севернее Валаама (рис. 2), где температура достигает 20 °С, хотя вокруг она около 18 °С. Иногда такой район может занимать до половины акватории озера, и снимки приходится отбраковывать. В ночные часы такого явления не наблюдается, поэтому количество пригодных для применения методом МСС снимков больше. Методика МСС, как отмечал [Doronzo et al., 2015], достаточно хорошо работает при временном интервале в пределах 6 часов и на Черном море при временном интервале в несколько часов [Afanasyev et al., 2002].

Кроме облачного покрова существует еще одно ограничение в применении метода МСС

для различных акваторий, заключающееся в отсутствии ярко выраженных горизонтальных градиентов температуры на поверхности, которые представляют собой необходимые структурные элементы для определения горизонтального переноса.

Применение метода МСС для расчетов поверхностных течений в Ладожском озере показало, что существуют локальные районы, как, например, на рис. 2 в центральной части, где векторы течений отсутствуют. Связано это с тем, что градиенты температуры здесь не превышают  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 50 км. Термические условия, при которых на поверхности воды градиенты имеют такие же или меньшие величины, складываются в озере в октябре-ноябре [Науменко, Каретников, 2002]. В этот период определить циркуляцию в озере не удалось.

Для применения метода сделаны следующие допущения. Температуру SST (Sea Surface Temperature) следует рассматривать как консервативный пассивный индикатор. Метод МСС можно использовать только для отслеживания течений, направленных вдоль температурных градиентов, поэтому он не подходит для обнаружения токов, движущихся вдоль поверхности температурных фронтов [Emery et al., 1986].

В наших исследованиях мы применяем модифицированный метод – нормализованную кросс-корреляцию [Haralick, Shapiro, 1992; Lewis, 1995] – хорошо себя зарекомендовавший в исследованиях [Gade, 2012]. Вычисления проводились в системах расчетов MatLab и Octave. Для первичной подготовки космической информации использовалась программа SeaDAS [SeaDAS...].

Разработанный нами метод отбора космической информации состоит из трех этапов. Первый заключается в выборе периодов в несколько суток, когда облачность над Ладожским озером составляет не более 10 процентов. Следующий – обработка отобранных изображений, полученных с сайта NASA Ocean Color [NASA...] для этих периодов. Заключительный этап представляет собой оценку меры близости термического состояния поверхности Ладожского озера на космических снимках. На этом этапе рассчитываются коэффициенты корреляции между массивами, выбираются пары ИК-изображений, для которых коэффициенты превышают 0,9 и вводится весовой коэффициент, учитывающий время между снимками [Гузиватый и др., 2020].

Для выявления структурных особенностей изучаемого поля течений проведены исследования по определению размера окна поиска (корреляционного окна). В условиях Ладожского озера это в первую очередь ветровая цирку-

ляция распространения речных вод. Обычно для океанов и морей при расчетах МСС используется окно  $22\times 22$  пикселя с шагом смещения в 2 пикселя, однако для Ладожского озера пространственные мезомасштабные температурные неоднородности не превышают несколько десятков километров [Naumenko, 1994]. Для определения оптимального размера корреляционного окна была проведена серия экспериментов, где оно менялось от 5 (5,5 км) до 42 (46,2 км) пикселей с шагом смещения 2 пикселя. Результаты расчетов для более чем 40 пар снимков в период открытой воды с июня по сентябрь показали, что наибольшее количество значимых векторов приходится на корреляционное окно размером  $18\times 18$  пикселей [Гузиватый и др., 2020]. Следует указать, что существуют и другие подходы в реализации этого метода, например, основанные не на одном окне шаблона, а на нескольких отдельных окнах разных размеров [Doronzo et al., 2015], а также вращении корреляционного окна [Emery et al., 1992].

Для проверки соответствия скоростей и направлений течений, рассчитанных методом МСС к условиям Ладожского озера, мы используем подход, предложенный Алексаниным с соавторами [2013], заключающийся в измерении скорости перемещения маркеров (характерных точек на изотермах) между двумя снимками с последующим расчетом векторов скорости. Сравнение векторов движения выбранных маркеров и результатов расчетов МСС для Ладожского озера показывает, что примерно 60 % направлений между перемещениями маркеров и рассчитанными значениями векторов имеют отклонения не более  $\pm 5^{\circ}$ . Около 6 % составляют максимальные отклонения, достигающие  $\pm 20^{\circ}$ . Разность скоростей, определенных методом маркеров и МСС, положительна, модальная величина составляет от 2 до 4 см/с, что указывает на некоторое завышение скоростей, однако сравнимое с точностью инструментального измерения течений [Гузиватый и др., 2020].

Скорости значимых поверхностных течений при нештормовых ветрах не превышают 0,4 м/с на поверхности Ладожского озера, что было показано на основе анализа натуральных наблюдений [Филатов, 1991]. Исходя из этого предположения, мы исключили из анализа скорости течения  $> 0,4$  м/с, если одновременно коэффициент кросс-корреляции  $< 0,8$ . Это условие достаточно жесткое, но позволяет избежать аномальных значений поверхностных течений. Хотя Эмери с соавторами [Emery et al., 1986] полагают, что для океанских условий можно использовать и более низкий коэффициент кросс-корреляции.

## Применение метода МСС для акваторий с различными размерами и термическим режимом

Метод МСС, использующий последовательные космические снимки, достаточно хорошо зарекомендовал себя для оценки поверхностных течений в Ладожском озере в период открытой воды [Гузиватый и др., 2020]. Предло-

женная нами усовершенствованная методика, разработанная к условиям Ладожского озера, требовала подтверждения, что она может быть применена к акваториям значительно большего размера и имеющим другие термические условия. В частности, стояла задача показать на примерах, что данный подход дает реальные, не противоречащие природе результаты. На крупных внутренних акваториях европейской



Рис. 1. Расположение водных объектов на европейской части России  
Fig. 1. Location of water bodies in the European part of Russia

Таблица 1. Основные морфометрические характеристики акваторий [Атлас..., 1980]

Table 1. Basic morphometric characteristics of water areas [Atlas..., 1980]

Озеро (море) Lake (sea)	Площадь поверхности, тыс. км <sup>2</sup> Surface area, thous. km <sup>2</sup>	Средняя/наибольшая глубина, м Average/greatest depth, m	Наибольшая длина/ширина, км Longest length/width, km
Черное море Black Sea	422	1315/2210	1200/600
Балтийское море Baltic Sea	419	50/470	1500/650
Каспийское море Caspian Sea	374	209/1025	1200/320
Белое море White Sea	90	67/350	600/450
Ладожское озеро Lake Ladoga	17,7	48*/230	219/125
Онежское озеро Lake Onego	9,7	29/127	248/92

Примечание. \*[Современное..., 2021].

Note. \*[Current..., 2021].

части России, включая Онежское озеро, Белое, Балтийское, Черное и Каспийское моря (рис. 1), только для Балтийского и Черного морей [Afanasyev et al., 2002; Gade et al., 2012] проводились исследования с использованием метода МСС.

Акватории расположены в разных широтных зонах от 40 до 65° с. ш., кроме этого, значительно отличаются друг от друга своими размерами (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что площадь наименьшей из рассматриваемых акваторий – Онежского озера более чем в 40 раз меньше самой большой – Черного моря, в то же время Черное море расположено южнее Белого примерно на 2000 км. Ветровая ситуация, время возникновения стратификации, величины горизонтальных температурных градиентов, возникновение апвеллингов (даунвеллингов) и вертикальных движений в слое скачка будут существенно отличаться на разных акваториях.

Поверхностный слой воды практически непрерывно находится под воздействием ветра, причем его направление и сила для различных акваторий может иметь значительные отличия. Результатом этого воздействия является движение поверхностного слоя воды, которое за счет трения передается более глубоким слоям. В период открытой воды с помощью метода МСС проведены расчеты пространственного распределения поверхностных течений на акваториях, как представлено в табл. 2, при различном направлении и скорости ветра на метеорологических станциях вокруг них, а по их результатам построены схемы переноса поверхностного слоя.

Для дат, указанных в табл. 2, выбраны 12 сеансов с температурой поверхности [NASA...] названных акваторий и обработаны по усовершенствованной методике, представленной выше. Затем для каждой акватории рассчитаны поверхностные течения методом МСС.

### **Ладожское озеро**

В Ладожском озере к концу июля, как следует из рис. 2, температура воды на поверхности в центре озера составляет 17–18 °С. Наблюдается устойчивая стратификация, слой скачка находится в этот период на глубине около 10 м [Науменко, Гузиватый, 2022]. Под действием северо-восточного ветра у восточного берега начинает формироваться апвеллинг с температурами 14–15 °С, на севере озера, у Валаама и в районе Приозерска, вероятно, в штилевых условиях сформировались не-

большие участки с температурами до 20 °С. В приустьевых участках Свири, Волхова и Вуоксы наблюдаются области теплых вод с температурами до 20 °С. Циркуляция охватывает юг и центральную часть озера, как следует из табл. 2, скорости течений составляют 0,3 м/с. Мода и медиана соответствуют друг другу, и вероятность появления модального значения не превышает 30 %. Полученные результаты не противоречат распределению течений на поверхности Ладожского озера в период открытой воды [Филатов, 1991].

### **Онежское озеро**

В Онежском озере к середине июня наблюдается устойчивая стратификация по всей акватории, что представлено на рис. 3. По берегам в заливах и губах температура поверхности может достигать 16 °С, в центре – 7–9 °С, а температурные градиенты в этот период в отдельных частях акватории достигают 7 °С на 20 км. Ветровая ситуация над Онежским озером по данным метеостанций Петрозаводск и Медвежьегорск характеризуется преобладанием северных, северо-западных составляющих со скоростями до 5 м/с. Такой однородный воздушный поток в Онежском озере формирует поверхностные течения со средней скоростью 0,2 м/сек, имеющие направление с северо-запада на юго-восток и захватывающие практически всю центральную часть. Очевидно, что существует соответствие между модой и медианой скоростей течений на поверхности, вероятность появления модального значения, так же как и на Ладожском озере, составляет 30 %. Полученные результаты не противоречат распределению течений на поверхности Онежского озера в период открытой воды [Филатов, 1991].

### **Белое море**

Площадь акватории Белого моря в 5 раз больше площади Ладожского озера (рис. 1). Размеры губ и заливов Белого моря соизмеримы с размерами Ладожского озера. В выбранную дату 16 июня температура поверхности в Горле Белого моря равна 6 °С, в Двинской губе – 16 °С. В Кандалакшском заливе, Двинской и Онежской губе хорошо выделяются температурные неоднородности на поверхности воды. В Двинской губе из-за впадения в нее Северной Двины, а в Онежской губе – реки Онега. В этот период по м/с Архангельск наблюдался ветер северных, северо-западных направлений силой 2–4 м/сек.

Таблица 2. Используемая ИК-космическая информация и статистические характеристики рассчитанных течений

Table 2. Applied space infrared information and statistical characteristics of the calculated currents

Озеро (море) Lake (sea)	Дата и время 1-го снимка Date and time of the 1 <sup>st</sup> image	Дата и время 2-го снимка Date and time of the 2 <sup>nd</sup> image	Время между снимками, мин Time between images, min	Количество значимых векторов Number of significant vectors	Медиана скорости течений, м/с Median current velocity, m/s	Мода, м/с / частота, % Mode, m/s /frequency, %	Стандартное отклонение, м/с Standard deviation, m/s
Ладожское озеро Lake Ladoga	23/07/2019 08:55	23/07/2019 10:45	110	1325	0,3	0,3/26,5	0,09
Онежское озеро Lake Onego	16/06/2019 19:55	16/06/2019 23:55	240	553	0,2	0,2/30,3	0,06
Белое море White Sea	16/06/2019 19:55	16/06/2019 23:55	240	2103	0,2	0,1/20,9	0,09
Балтийское море Baltic Sea	17/06/2019 20:35	18/06/2019 00:40	245	38501	0,1	0,1/17,3	0,07
Черное море Black Sea	03/05/2019 19:30	03/05/2019 23:35	250	5761	0,2	0,1/16,0	0,13
Каспийское море Caspian Sea	06/05/2019 18:19	06/05/2019 22:30	252	9710	0,1	0,1/24,6	0,1

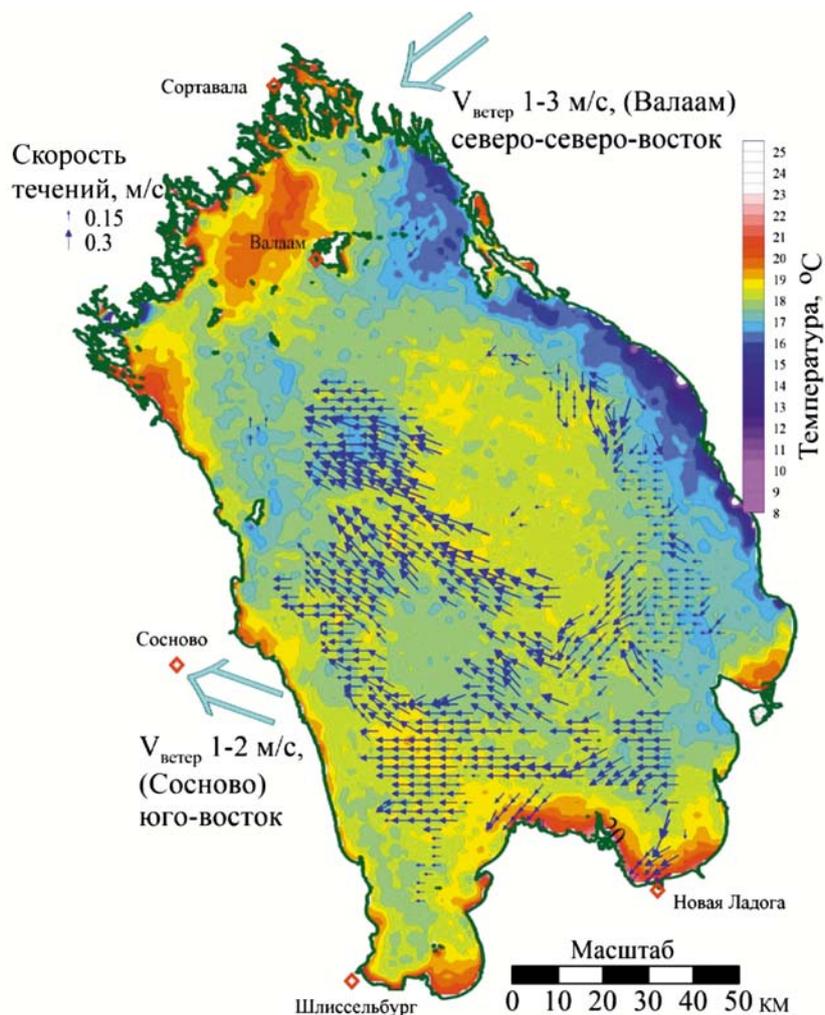


Рис. 2. Рассчитанные течения на поверхности Ладожского озера 23 июля 2019 года

Fig. 2. Calculated currents at the surface of Lake Ladoga on July 23, 2019

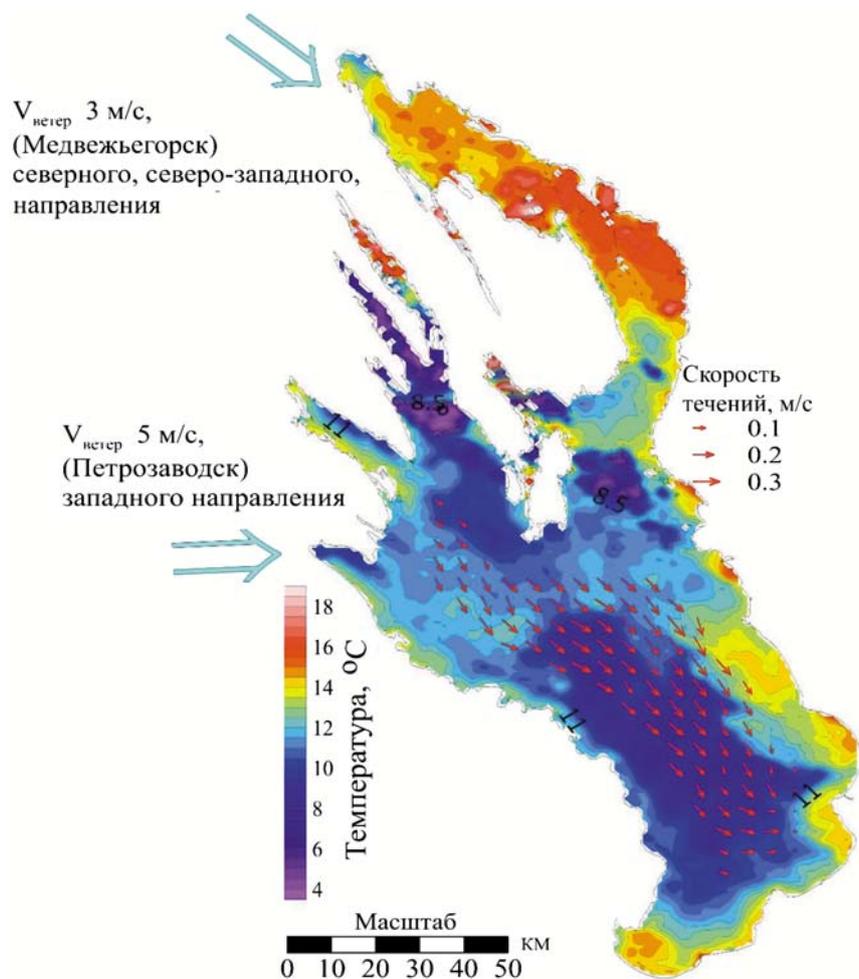


Рис. 3. Рассчитанные течения на поверхности Онежского озера 16 июня 2019 года  
 Fig. 3. Calculated currents at the surface of Lake Onego on June 16, 2019

На рис. 4 представлена система течений на поверхности Белого моря. В целом она не противоречит ветру, наблюдавшемуся в этот период над морем, и горизонтальным температурным градиентам на поверхности [Доронин, 1986; Толстикова, 2016]. Как следует из табл. 2, при указанном ветре скорости течений на поверхности меньше, чем на Ладожском и Онежском озерах, и меньше вероятность появления модального значения.

### Балтийское море

Балтийское море протянулось с севера на юг на 1300 и с запада на восток более чем на 1000 км. Большое количество заливов, островов, бухт, близость берега создают достаточно разнообразное поле ветра над Балтийским морем, и, как следствие, пространственно-временные вариации мезо- и сино-

тических масштабов системы течений для каждого района будут иметь свои особенности [Доронин, 1986; Динамика..., 2007]. Температура на поверхности Балтийского моря для разных районов может значительно отличаться – например, в Ботническом и Гданьском заливах. На м/с Хельсинки и Таллин 17 июля и в предшествующие сутки ветер менял направление с северо-запада на западо-юго-запад. К моменту спутниковой съемки наблюдался ветер западо-юго-западного направления со скоростью 2–4 м/сек.

Представленная на рис. 5 система течений на поверхности Балтийского моря указывает, что для каждого района существует своя система циркуляций, с наиболее вероятными скоростями течений, как видно из табл. 2, около 0,1 м/с. Полученные результаты не противоречат распределению течений на поверхности Балтийского моря в период открытой воды [Динамика..., 2007].

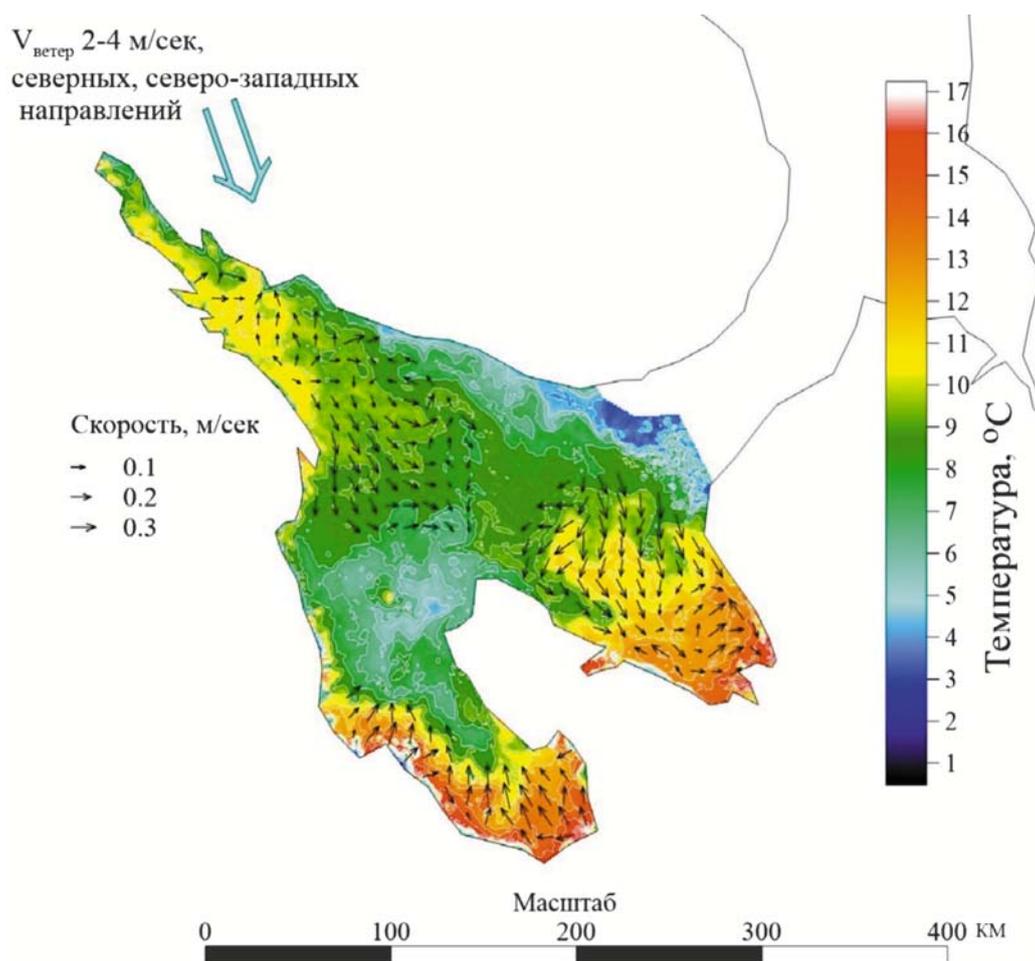


Рис. 4. Рассчитанные течения на поверхности Белого моря 16 июня 2019 года  
 Fig. 4. Calculated currents at the surface of the White Sea on June 16, 2019

### Черное море

3 мая 2019 года в Черном море, как представлено на рис. 6, температура поверхности практически по всей акватории составляла 12–14 °С. На ИК-снимке в этот период можно выделить температурные особенности в виде грибовидных структур, например на юго-западе от Крымского полуострова, которые по размерам сопоставимы с Ладожским озером.

Анализ ветра, по данным метеорологических станций, расположенных в Одессе, Бургасе, Новороссийске, Батуми, показывает (рис. 6) наличие разнонаправленных небольших скоростей ветра, до 3 м/с. Это формирует неравномерное поле ветра, которое воздействует на различные части морской акватории и генерирует разнонаправленные поверхностные течения, как видно на рис. 6, со скоростями около 0,1 м/с. Вероятность появления этих скоростей составляет 16 %. Полученная структура поверх-

ностных течений соответствует результатам, приведенным в монографии [Комплексные..., 2002].

### Каспийское море

6 мая 2019 года в Каспийском море (рис. 7) поверхность воды в отдельных районах прогрелась от 9 до 18 °С. В момент принятия ИК-информации у западного берега центральной части моря образовался обширный апвеллинг.

Анализ ветра по трем метеостанциям (Баку, Актау, Лагань), расположенным на значительном расстоянии друг от друга, свидетельствует о большой пространственной неоднородности ветрового режима над акваторией Каспийского моря. Это приводит к возникновению разнонаправленных течений, вихревых структур на поверхности со скоростями около 0,1 м/с. Заметим, что это не противоречит результатам, приведенным в [Каспийское..., 2007].

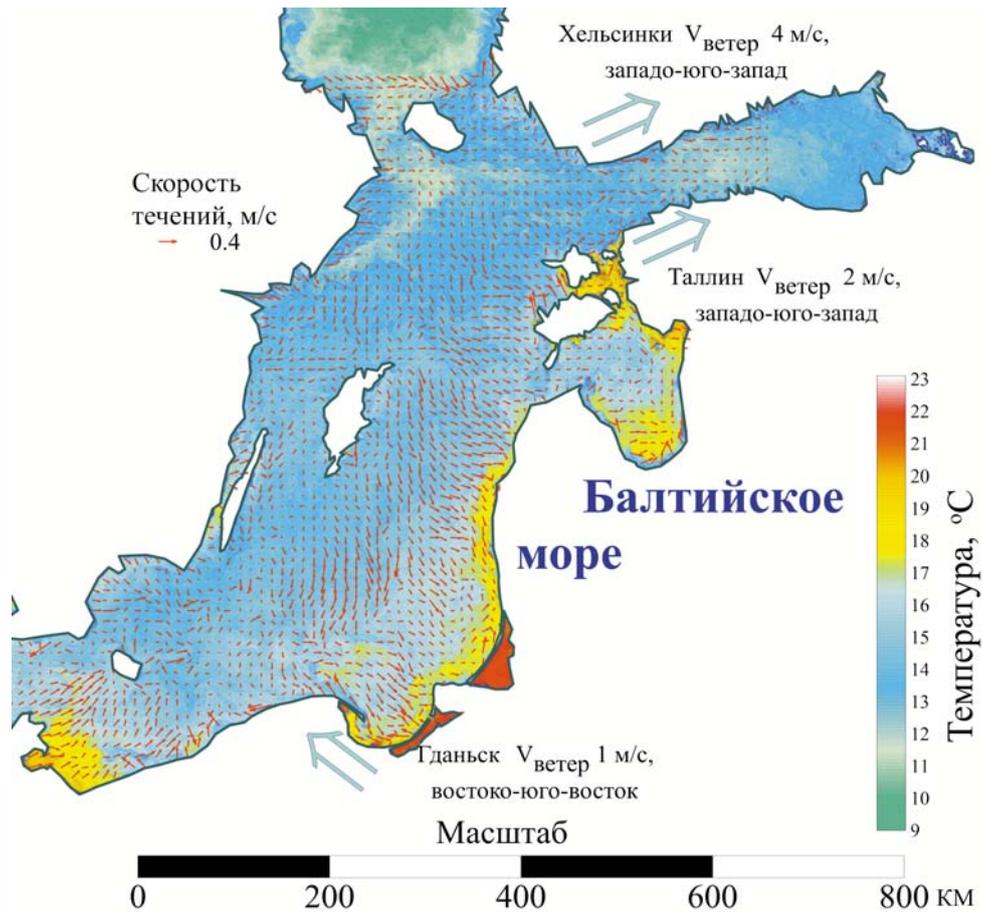


Рис. 5. Рассчитанные течения на поверхности Балтийского моря в ночь с 17 на 18 июня 2019 года

Fig. 5. Calculated currents at the surface of the Baltic Sea on the night of June 17 –18, 2019

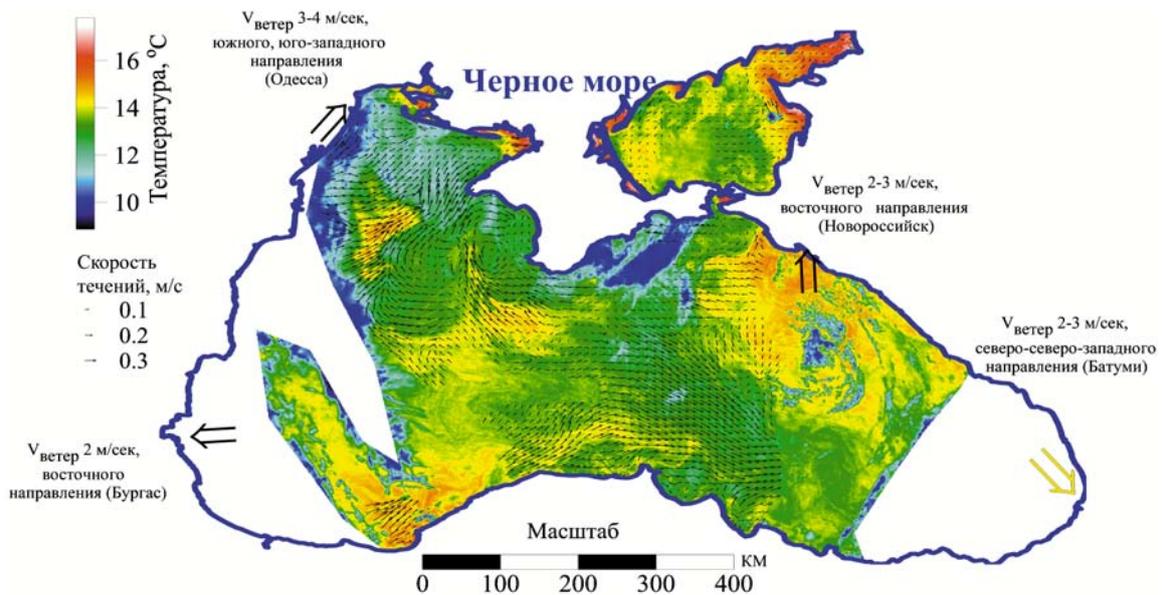


Рис. 6. Рассчитанные течения на поверхности Черного моря 3 мая 2019 года

Fig. 6. Calculated currents at the surface of the Black Sea on May 3, 2019

## Выводы

Пространственное распределение течений мезо- и синоптических масштабов на поверхности крупных акваторий представляет сочетание экмановского переноса и геострофических течений, и определяется перенос различных примесей как естественного, так и искусственного происхождения. Метод МСС для оценки системы поверхностных течений на значительных океанских площадях был адаптирован

и усовершенствован для внутренних водоемов, включая Ладожское и Онежское озера. Предложены новые процедуры выбора наиболее информативных космических ИК-съемок для анализа течений. Разработан и апробирован подход по определению меры связности изображений, полученных с космических аппаратов, позволяющий значительно сократить время, затрачиваемое на обработку информации больших объемов. Применение метода МСС для расчета течений в акваториях

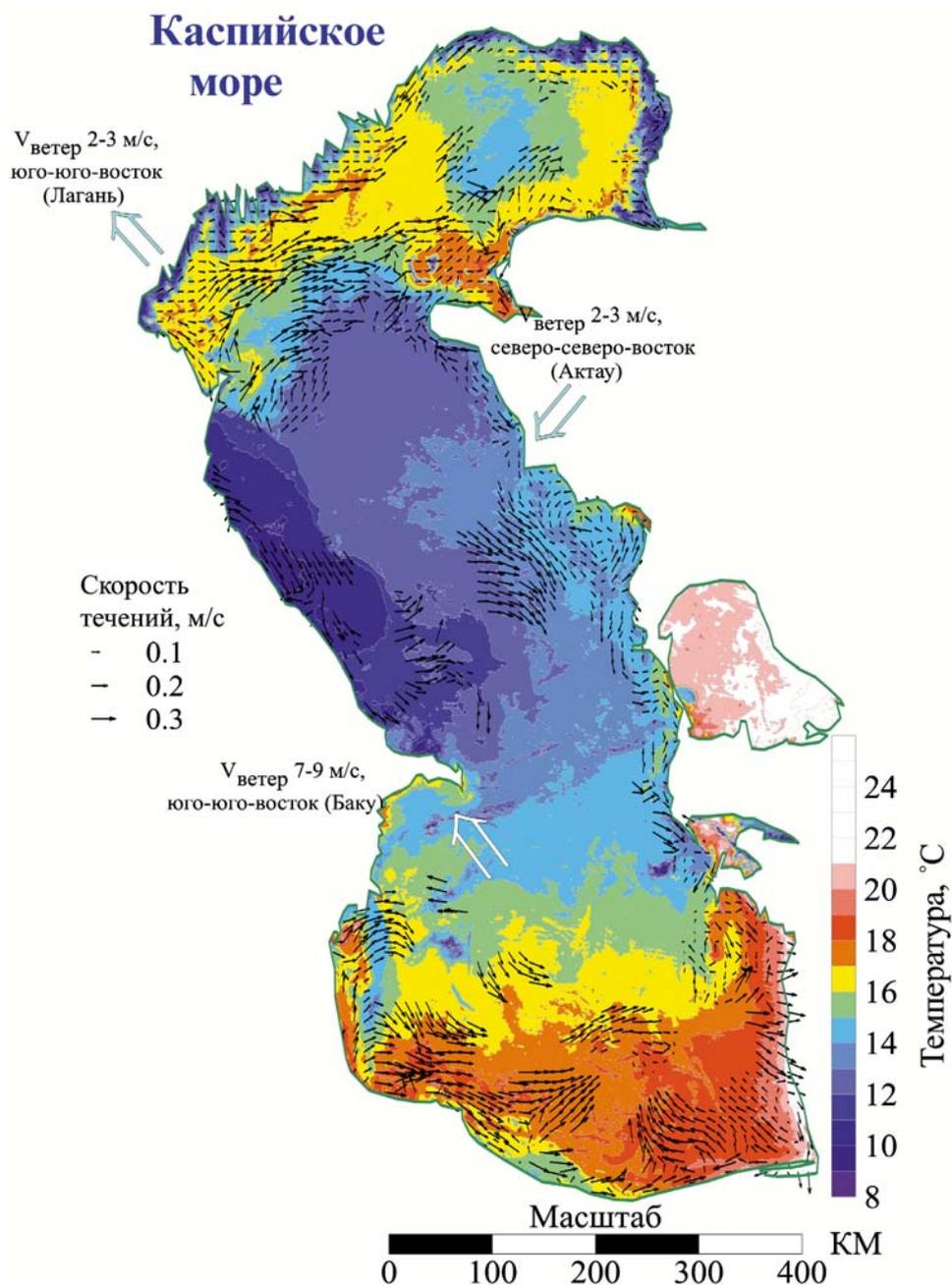


Рис. 7. Рассчитанные течения на поверхности Каспийского моря 6 мая 2019 года  
Fig. 7. Calculated currents at the surface of the Caspian Sea on May 6, 2019

различного размера и расположенных на различных широтах, с использованием методических подходов, разработанных на Ладожском озере, показало свою эффективность. Впервые для периода открытой воды рассчитаны поверхностные течения при определенных ветровых ситуациях синоптического и мезомасштаба для Онежского озера, Белого, Балтийского, Черного и Каспийского морей.

В весенний период, когда происходит нагревание и поверхностные пространственные температурные градиенты наиболее выражены, применение метода МСС, вероятно, является наиболее предпочтительным.

Для Онежского озера, Белого и Балтийского морей впервые проведен синхронный расчет системы течений на поверхности (табл. 2). Полученные результаты дают наглядное представление о поверхностной циркуляции различных акваторий за небольшой промежуток времени (16–17 июня 2019 г.).

В заключение следует подчеркнуть, что в шестидесятые годы прошлого века для Ладожского озера был применен динамический метод расчета течений, взятый из океанологии [Охлопкова, 1966]. В настоящее время метод МСС, разработанный для океанских условий, успешно применен для крупных озер и морей, что подтверждает взаимовлияние и общность между методами изучения этих разномасштабных водных объектов [Кондратьев и др., 1986; Kondratyev et al., 1999; Downing, 2014]. Метод МСС безусловно перспективен в условиях отсутствия прямых измерений течений как в крупных озерах, так и в океанах. Использование метода в настоящее время является оптимальной процедурой для верификации системы поверхностных течений, рассчитанных с использованием термогидродинамических моделей.

## Литература

Алексанин А. И., Алексанина М. Г., Карнацкий А. Ю. Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 131–142.

Андреев О. А., Воробьева Л. В. Ветровая и стоковая циркуляция Ладожского озера (численные эксперименты) // Моделирование и экспериментальные исследования гидрологических процессов в озерах. Л.: Наука, 1986. С. 17–21.

Астраханцев Г. П., Егорова Н. Б., Оганесян Л. А., Руховец Л. А. Трехмерная нестационарная модель Ладожского озера // Труды ГГИ. 1988. № 321. С. 32–40.

Атлас океанов. Термины. Понятия. Справочные таблицы / ГУНИО МО СССР. 1980 г. 156 с.

Гузиватый В. В., Науменко М. А. Оценка течений на поверхности крупного озера с помощью последовательных инфракрасных изображений // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: Труды V Всерос. конф. (г. Владимир, 11–14 октября 2016 г.). М., 2016. С. 113–119.

Гузиватый В. В., Науменко М. А., Румянцев В. А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера методом максимальной кросс-корреляции // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 20–30. doi: 10.31857/S0205961420010042

Динамика вод Балтийского моря в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов / Под ред. Е. А. Захарчука. СПб.: Гидрометеоиздат, 2007. 351 с.

Доронин Ю. П. Региональная океанология. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 303 с.

Каспийское море: экстремальные гидрологические события / Ред. М. В. Болгов, Г. Ф. Красножон, А. А. Любушин. М.: Наука, 2007. 381 с.

Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М.: Наука, 2002. 476 с.

Кондратьев К. Я., Адаменко В. Н., Власов В. П., Дружинин Г. В., Крейман К. Д., Поздняков Д. В., Румянцев В. Б., Тихомиров А. И. Большое озеро как имитационная модель океана. Л.: Наука, 1986. 63 с.

Малинина Т. И., Филатова И. В., Филатов Н. Н. Изменчивость водного баланса и моделирование течений Ладожского озера // Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водоемах: Мат-лы школы-семинара. Л.: Наука, 1984. С. 191–197.

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

Науменко М. А., Каретников С. Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией // ДАН. 2002. Т. 386, № 2. С. 250–253.

Охлопкова А. Н. Течения Ладожского озера // Труды Лаб. озероведения ЛГУ. 1966. Т. 20. С. 265–278.

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев, Ш. Р. Поздняков, В. А. Румянцев. М.: РАН, 2021. 640 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3

Толстиков А. В. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. М.: Геос, 2016. 212 с.

Филатов Н. Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 191 с.

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

Afanasiev Y. D., Kostianoy A. G., Zatsepin A. G., Poulain P.-M. Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea '99 experiment // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107, no. 8. P. 3098–4003.

Doranzo B., Taddei S., Brandini C., Fattorini M. Extensive analysis of potentialities and limitations of a maxi-

imum cross-correlation technique for surface circulation by using realistic ocean model simulations // *Ocean Dynamics*. 2015. No. 65. P. 1183–1198. doi: 10.1007/s10236-015-0859-1

Downing J. A. Limnology and oceanography: two estranged twins reuniting by global change // *Inland Waters*. 2014. No. 4. P. 215–232. doi: 10.5268/IW-4.2.753

Emery W. J., Fowler C., Clayson C. A. Satellite image derived Gulf Stream currents compared with numerical model results // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 1992. Vol. 9. P. 286–304.

Emery W. J., Thomas A. C., Collins M. J., Crawford W. R., Mackas D. L. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91, no. 11. P. 12865–12878.

Gade M., Seppke B., Dreschler-Fischer L. Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data // *Int. J. Remote Sens.* 2012. Vol. 33. P. 3122–3146. doi: 10.1080/01431161.2011.628711

Haralick R. M., Shapiro L. G. *Computer and robot vision*. Vol. II. Addison-Wesley, 1992. P. 316–317.

Kamachi M. Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: limitations and applications of maximum cross correlation method with rotational registration // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94, no. 12. P. 18227–18233.

Kelly K. A., Strub P. T. Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97, no. 6. P. 9653–9668.

Kondratyev K. Ya., Filatov N. N. *Limnology and remote sensing: A contemporary approach*. London: Springer Science Business Media, 1999. 406 p.

Lewis J. P. Fast normalized cross-correlation // *Industrial Light & Magic*. 1995. No. 10.

NASA Ocean Color [Электронный ресурс]. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 11.12.2023).

Naumenko M. A. Some aspects of the thermal regime of large lakes: Lake Ladoga and Lake Onega // *Water Pollut. Res. J. Can.* 1994. Vol. 29, no. 2/3. P. 423–439.

Notarstefano G., Poulain P.-M., Mauri E. Estimation of surface currents in the Adriatic Sea from sequential infrared satellite images // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2008. Vol. 25, no. 2. P. 271–285.

Romeiser R., Suchandt S., Runge H., Steinbrecher U., Grunler S. First analysis of TerraSAR-X along-track InSAR-derived current fields // *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 2010. No. 48. P. 820–829.

SeaDAS – Sea WIFS Data Analysis System [Электронный ресурс]. URL: <http://seadas.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 11.12.2023).

Steissberg T. E., Simon J. H., Geoffrey S. S. Measuring surface currents in lakes with high spatial resolution thermal infrared imagery // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. L11402. doi: 10.1029/2005GL022912

Wunsch C. Observing ocean circulation from space // *Oceanus*. 1992. Vol. 35, no. 2. P. 9–17.

Zavialov P. O., Grigorieva J. V., Moeller Jr. O., Kostianoy A. G., Gregoirev M. Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. 10. P. 3160–3178.

## References

Afanasyev Y. D., Kostianoy A. G., Zatsepin A. G., Poulain P.-M. Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea '99 experiment. *J. Geophys. Res.* 2002;107(8):3098–4003.

Aleksanin A. I., Aleksanina M. G., Karnatsky A. Yu. Automatic computation of sea surface velocities on a sequence of satellite images. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2013;10(2):131–142. (In Russ.)

Andreev O. A., Vorob'eva L. V. Wind and runoff circulation of Lake Ladoga (numerical experiments). *Modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya gidrologicheskikh protsessov v ozerakh = Modeling and experimental studies of hydrological processes in lakes*. Leningrad; 1986. P. 17–21. (In Russ.)

Astrakhantsev G. P., Egorova N. B., Oganeyan L. A., Rukhovets L. A. Three-dimensional nonstationary model of Lake Ladoga. *Proceedings of GGI*. 1988;321:32–40. (In Russ.)

Atlas of oceans. Terms. Concepts. Reference tables. GUNIO of the USSR Ministry of Defense. 1980. 156 p. (In Russ.)

Bolgov M. V., Krasnozhon G. F., Lyubushin A. A. (eds.). Caspian Sea: extreme hydrological events. Moscow: Nauka; 2007. 381 p. (In Russ.)

Doronin Yu. P. *Regional oceanology*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1986. 303 p. (In Russ.)

Doronzo B., Taddei S., Brandini C., Fattorini M. Extensive analysis of potentialities and limitations of a maximum cross-correlation technique for surface circulation by using realistic ocean model simulations. *Ocean Dynamics*. 2015;65:1183–1198. doi: 10.1007/s10236-015-0859-1

Downing J. A. Limnology and oceanography: two estranged twins reuniting by global change. *Inland Waters*. 2014;4:215–232. doi: 10.5268/IW-4.2.753

Emery W. J., Fowler C., Clayson C. A. Satellite image derived Gulf Stream currents compared with numerical model results. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 1992;9:286–304.

Emery W. J., Thomas A. C., Collins M. J., Crawford W. R., Mackas D. L. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *J. Geophys. Res.* 1986;91(11): 12865–12878.

Filatov N. N. *Hydrodynamics of lakes*. St. Petersburg: Nauka; 1991. 191 p. (In Russ.)

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

Gade M., Seppke B., Dreschler-Fischer L. Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data. *Inter. J. Remote Sens.* 2012;33:3122–3146. doi: 10.1080/01431161.2011.628711

Guzivaty V. V., Naumenko M. A. Assessment of currents on the surface of a large lake using sequential infrared images. *Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii: Trudy V Vseros. konf. (g. Vladimir, 11–14 okt. 2016 g.) = Ice and thermal processes*

on water bodies of Russia: Proceedings of V All-Russian conference (Oct. 11–14, 2016, Vladimir). Moscow; 2016. P. 113–119. (In Russ.)

Guzivaty V. V., Naumenko M. A., Rumyantsev V. A. Determining the velocity of the upper layer of Lake Ladoga by means of maximum cross correlation (MCC). *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2020;56:1678–1686. doi: 10.1134/S0001433820120415

Haralick R. M., Shapiro L. G. *Computer and robot vision*. Vol. II. Addison-Wesley; 1992. P. 316–317.

Kamachi M. Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: limitations and applications of maximum cross correlation method with rotational registration. *J. Geophys. Res.* 1989;94(12):18227–18233.

Kelly K. A., Strub P. T. Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone. *J. Geophys. Res.* 1992;97(6):9653–9668.

Kondratyev K. Ya., Filatov N. N. *Limnology and remote sensing: A contemporary approach*. London: Springer Science Business Media; 1999. 406 p.

Kondratyev K. Ya., Adamenko V. N., Vlasov V. P., Druzhinin G. V., Kreiman K. D., Pozdnyakov D. V., Rumyantsev V. B., Tikhomirov A. I. A large lake as a simulation model of the ocean. Leningrad: Nauka; 1986. 63 p. (In Russ.)

Kondratyev S. A., Pozdnyakov Sh. R., Rumyantsev V. A. (eds.). *Modern state and problems of anthropogenic transformation of the Ladoga Lake ecosystem under the conditions of changing climate*. Moscow: RAS; 2021. 640 p. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3 (In Russ.)

Lewis J. P. Fast normalized cross-correlation. *Industrial Light & Magic*. 1995;10.

Malinina T. I. I., Filatova I. V., Filatov N. N. Variability of water balance and modeling of currents of Lake Ladoga. *Vzaimodeistvie mezhdru vodoi i sedimentami v ozerakh i vodoemakh: Mat-ly shkoly-seminara = Interaction between water and sediments in lakes and reservoirs: Proceedings of the school-seminar*. Leningrad: Nauka; 1984. P. 191–197. (In Russ.)

NASA Ocean Color. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (accessed: 11.12.2023).

Naumenko M. A. Some aspects of the thermal regime of large lakes: Lake Ladoga and Lake Onega. *Water Pollut. Res. J. Can.* 1994;29(2/3):423–439.

Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Methodical approaches and results of the analysis of climatic seasonal course of parameters of stable stratification of a dimictic lake (by the example of the central part of Lake Ladoga). *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022;58(1):52–62. doi: 10.31857/S0002351522010102 (In Russ.)

Naumenko M. A., Karetnikov S. G. Seasonal evolution of the spatial distribution of water surface temperature of Lake Ladoga in connection with its morphometry. *Dokl. Earth Sci.* 2002;386(2):250–253. (In Russ.)

Notarstefano G., Poulain P.-M., Mauri E. Estimation of surface currents in the Adriatic Sea from sequential infrared satellite images. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2008;25(2):271–285.

Okhlopkova A. N. Currents of Lake Ladoga. *Trudy Lab. ozerovedeniya LGU = Proceedings of the Laboratory of Lake Research of the Leningrad State University*. 1966;20:265–278. (In Russ.)

Romeiser R., Suchandt S., Runge H., Steinbrecher U., Grunler S. First analysis of Terra SAR-X along-track In SAR-derived current fields. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2010;48:820–829.

SeaDAS – Sea WiFS Data Analysis System. URL: <http://seadas.gsfc.nasa.gov> (accessed: 11.12.2023).

Steissberg T. E., Simon J. H., Geoffrey S. S. Measuring surface currents in lakes with high spatial resolution thermal infrared imagery. *Geophys. Res. Lett.* 2005;32:L11402. doi: 10.1029/2005GL022912

Tolstikov A. V. Variability of the White Sea surface layer temperature. Moscow: GEOS; 2016. 212 p. (In Russ.)

Wunsch C. Observing ocean circulation from space. *Oceanus*. 1992;35(2):9–17.

Zakharchuk E. A. (ed.). *Baltic Sea water dynamics in the synoptic range of spatial and temporal scales*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 2007. 351 p. (In Russ.)

Zatsepin A. G., Flint M. V. (ed.). *Integrated studies of the northeastern part of the Black Sea*. Moscow: Nauka; 2002. 476 p. (In Russ.)

Zavialov P. O., Grigorieva J. V., Moeller Jr. O., Kostinoy A. G., Gregoirev M. Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique. *J. Geophys. Res.* 2002;107(10):3160–3178.

Поступила в редакцию / received: 11.12.2023; принята к публикации / accepted: 01.02.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Гузиватый Вадим Викторович

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

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

### Науменко Михаил Арсеньевич

д-р геогр. наук, профессор, руководитель лаборатории географии и гидрологии

e-mail: [m.a.naumenko@mail.ru](mailto:m.a.naumenko@mail.ru)

## CONTRIBUTORS:

### Guzivaty, Vadim

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

### Naumenko, Mikhail

Dr Sci. (Geogr.), Professor, Head of Laboratory

УДК 574.5.081.001 (261.245)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПРЯМОГО ПОИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ В МОДЕЛЯХ ЭКОСИСТЕМ НЕВСКОЙ ГУБЫ И ВИСЛИНСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

К. А. Подгорный<sup>1\*</sup>, О. А. Дмитриева<sup>1,2</sup>, А. С. Семенова<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО») (ул. Дмитрия Донского, 5, Калининград, Россия, 236022), \*kapborok@mail.ru

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский пр-т, 36, Москва, Россия, 117997)

<sup>3</sup> Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН (п. Борок, 109, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия, 152742)

Проведен сравнительный анализ применения алгоритмов прямого поиска для выполнения автоматической настройки и оценки значений параметров двух моделей нестратифицированных водных экосистем – Невской губы (НГ) и Вислинского залива (ВЗ) Балтийского моря. Обе модели построены на одних и тех же методологических принципах, однако имеют разную структуру, разное количество модельных переменных и эмпирических параметров. Для экосистемы ВЗ биогидрохимический блок состоит из двух частей: «Планктонного блока» и блока «Бентос». Моделирование процессов трансформации биогенных веществ в заливе проведено совместно для водной среды и верхнего (деятельного) слоя донных отложений. В модели экосистемы НГ используется «Планктонный блок», а все процессы описываются только для водной среды. Моделирование позволяет количественно исследовать механизмы процессов биогидрохимической трансформации: соединений С, N, P и Si в экосистеме ВЗ; соединений N и P – в экосистеме НГ. Обе модели позволяют изучать особенности пространственно-временной динамики растворенного в воде кислорода. Модель экосистемы НГ содержит 58 эмпирических параметров, а модель экосистемы ВЗ – 330. В качестве критерия адекватности моделей использован критерий Тейла. Решение оптимизационной задачи основано на компьютерной реализации двухэтапного алгоритма прямого поиска. На первом этапе применяли алгоритм случайного поиска. На втором этапе выполнялся локальный поиск с помощью модифицированного симплексного метода Нелдера – Мида. Показано, что применяемые алгоритмы эффективны. Они обеспечивают надежность и вычислительную сходимость получаемых результатов. Установлено, что для ряда параметров рассмотренных моделей статистически достоверны межгодовые отличия значений. Проведена оценка чувствительности моделей к изменениям значений параметров.

Ключевые слова: экосистема; математическое моделирование; имитационная модель; алгоритмы прямого поиска; параметрическая чувствительность модели

Для цитирования: Подгорный К. А., Дмитриева О. А., Семенова А. С. Сравнительный анализ применения алгоритмов прямого поиска для оценки значений параметров в моделях экосистем Невской губы и Вислинского залива Балтийского моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 79–94. doi: 10.17076/lim1860

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось в рамках государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00007-22-00 часть II, раздел 5 и государственного задания ИО РАН им. П. П. Ширшова FMWE-2024-0021.

**K. A. Podgornyi<sup>1\*</sup>, O. A. Dmitrieva<sup>1,2</sup>, A. S. Semenova<sup>1,3</sup>. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF DIRECT SEARCH ALGORITHMS FOR ESTIMATING VALUES OF PARAMETERS IN ECOSYSTEMS MODELS FOR THE NEVA BAY AND VISTULA LAGOON OF THE BALTIC SEA**

<sup>1</sup> Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography “VNIRO”, Atlantic Branch of VNIRO (“AtlantNIRO”) (5 Dm. Donskogo St., 236022 Kaliningrad, Russia), \*kapborok@mail.ru

<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36 Nakhimovsky Av., 117997 Moscow, Russia)

<sup>3</sup> Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences (109 Borok, 152742 Nelouzsky District, Yaroslavl Region, Russia)

The article presents a comparative analysis of the use of direct search algorithms to perform automatic tuning and assessment of parameter values for two models of non-stratified aquatic ecosystems: the Neva Bay (NB) and the Vistula Lagoon (VL) of the Baltic Sea. Both models are built on the same methodological principles, but they have different structures, different numbers of model variables and empirical parameters. For the VL ecosystem, the biohydrochemical block consists of two parts: the «Plankton block» and the «Benthos» block. Modeling of the nutrients transformation processes in the lagoon was carried out jointly for the aquatic environment and the upper (active) layer of bottom sediments. The NB ecosystem model uses the «Plankton block», and all processes are described only for the aquatic environment. Modeling enables to quantitatively investigate the mechanisms of biohydrochemical transformation processes: compounds of C, N, P and Si in the ecosystem of the VL; N and P compounds in the NB ecosystem. Both models provide the means to study the features of spatiotemporal dynamics of oxygen dissolved in water. The NB ecosystem model contains 58 empirical parameters, while the VL ecosystem model contains 330 ones. The Theil criterion was used as a criterion for the models adequacy. The optimization problem is solved due to the two-stage computer-aided direct search algorithm. A random search algorithm was used at the first stage. At the second stage, a local search is performed using the modified Nelder-Mead simplex method. The used algorithms proved to be effective. They ensure reliability and computational convergence of the obtained calculation results. The article shows that interannual differences in parameter values are statistically significant for a number of parameters of the models under consideration. The models sensitivity to changes in parameters values was assessed.

**Keywords:** ecosystem; mathematical modeling; simulation model; direct search algorithms; parametric sensitivity of the model

For citation: Podgornyi K. A., Dmitrieva O. A., Semenova A. S. Comparative analysis of the application of direct search algorithms for estimating values of parameters in ecosystems models for the Neva Bay and Vistula Lagoon of the Baltic Sea. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 79–94. doi: 10.17076/lim1860

**Funding.** Financial support for the study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution «VNIRO» No. 076-00007-22-00 part II, section 5 and under state assignment to the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences No. FMWE-2024-0021.

## Введение

При разработке и использовании математических моделей природных экосистем исследователи сталкиваются с целым рядом неопределенностей разного типа [Model..., 2005; Podgornyj, Leonov, 2015; Hipsey et al., 2020; Steenbeek et al., 2021]. В той или иной степени проблема неопределенности по объективным причинам существует всегда.

Изучение важнейших механизмов функционирования природных экосистем невозможно осуществить без совместного использования мониторинговых наблюдений, проведения систематических междисциплинарных исследований, использования методологии системного анализа и аппарата математического моделирования. При этом необходимо учитывать неопределенности имеющихся знаний и представлений об особенностях функционирования водных экосистем разного типа, недостаток данных непосредственных наблюдений. Все это приводит к возникновению неопределенностей на этапах формирования структуры моделей и количественной оценки значений их эмпирических параметров [Subbey, 2018; Hipsey et al., 2020; Steenbeek et al., 2021].

Одной из наиболее трудных и принципиальных проблем математического моделирования является проблема количественной оценки значений эмпирических параметров моделей [Podgornyj, Leonov, 2015; Hipsey et al., 2020]. В большинстве случаев при разработке математических моделей водных экосистем исследователи располагают более или менее достаточной и надежной информацией о значениях и степени пространственно-временной изменчивости переменных состояния экосистем – биомасс гидробионтов, концентраций соединений биогенных элементов и растворенного в водной среде кислорода. В то же время сведений о значениях большого числа эмпирических параметров, которые необходимо использовать в модели при математическом описании физико-химических и биологических процессов, по-прежнему крайне мало [Hipsey et al., 2020].

С формальной точки зрения суть задачи параметризации имитационной модели водной экосистемы состоит в том, чтобы найти наиболее оптимальные значения эмпирических параметров модели с целью обеспечить экстремальное значение некоторого количественного критерия – целевой функции. Параметры модели подбирают таким образом, чтобы найти наилучшее соответствие между модельными и наблюдаемыми данными.

Этого можно добиться либо путем корректировки набора параметров модели методом проб и ошибок (ручная калибровка), либо с помощью тех или иных алгоритмов оптимизации. В современных моделях водных экосистем количество эмпирических параметров может достигать нескольких сотен. Поэтому решение задачи поиска оптимальных значений эмпирических параметров возможно только с помощью разных методов и алгоритмов оптимизации. Важное преимущество методов оптимизации заключается в том, что они являются объективными и повторяемыми методологиями, которые с большой долей вероятности приведут к оптимальному набору параметров [Hipsey et al., 2020].

В качестве критерия адекватности модели можно использовать самые разные по своей структуре критерии (метрики) [Bennett et al., 2013; Harmel et al., 2014; Мотовилов, Гельфан, 2018; Jackson et al., 2019; Hipsey et al., 2020]. Вопрос о выборе конкретного критерия адекватности модели и структуры целевой функции решают по-разному [Marsili-Libelli, 1992; Finley et al., 1998; Marsili-Libelli et al., 2003; Podgornyj, Leonov, 2015; Subbey, 2018]. Во всех таких критериях значение целевой функции оценивают в зависимости от некоторого множества параметров модели. Многие из предложенных критериев требуют для своего применения соблюдения ряда статистических требований (например, требование о законе распределения величин и т. п.). Однако обеспечить выполнение таких требований для гидробиологических данных возможно далеко не всегда. Поэтому строгие статистические критерии оценки адекватности моделей во многих случаях не подходят, и нужно использовать более гибкие подходы и другие метрики.

*Основная цель* данной работы состоит в том, чтобы на примере имитационных моделей двух водных экосистем – Невской губы и Вислинского залива Балтийского моря – провести сравнительный анализ применения, эффективности и ряда статистических свойств алгоритмов прямого поиска для оценки значений модельных параметров. Обе экосистемы имеют сходные морфометрические и гидрологические условия, близкое географическое положение. Модели построены на одних и тех же методологических принципах и подходах. Сравнительный анализ позволит ответить на важные методические вопросы, которые связаны с процедурами калибровки моделей, оценками чувствительности моделей к изменениям значений параметров.

## Материалы и методы

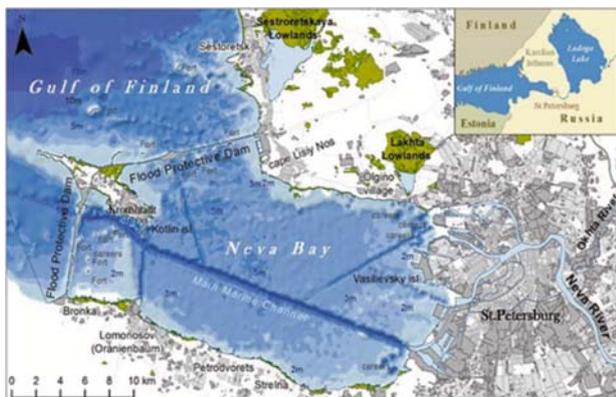
### *Характерные особенности экосистем Невской губы, Вислинского залива Балтийского моря и структуры имитационных моделей*

Невская губа (НГ) Финского залива Балтийского моря – предустьевая зона р. Невы (рис. 1, а). С востока границей НГ служит устье Невы, на западе граница проходит по линии Лисий Нос – Кронштадт – Ломоносов. Длина губы 21 км, наибольшая ширина 15 км, площадь водного зеркала 329 км<sup>2</sup>, преобладающая глубина 3–5 м. Объем водной массы при среднем стоянии уровня составляет 1,2 км<sup>3</sup>. С Финским заливом НГ сообщается через два пролива у о. Котлин – Северные и Южные ворота.

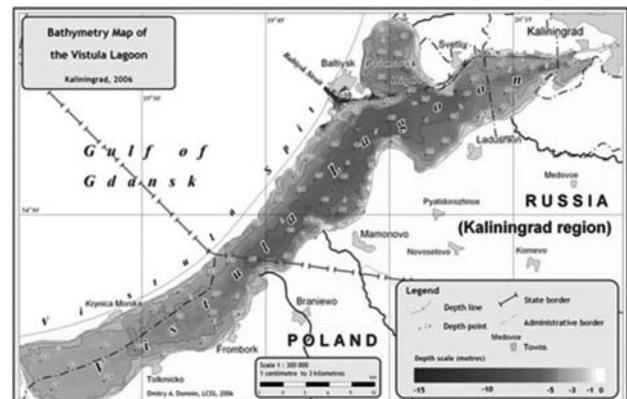
Невская губа – сложная водная экосистема. Она сложна и для проведения полевых экологических исследований, и для разработки математических моделей. Вместе с восточной частью Финского залива НГ является нижним звеном одной из наиболее крупных водных систем Европы, которая включает в себя р. Неву, а также такие большие озера, как Ладожское, Онежское, Сайма и Ильмень. Своеобразие НГ обусловлено целым рядом причин: на формирование ее водной массы значительное влияние оказывает Ладожское озеро, воды которого со стоком р. Невы поступают в НГ в объеме ~ 2400–2500 м<sup>3</sup>/с; кратность годового водообмена за счет притока речных вод равна 66, что обеспечивает обновление воды в ней в среднем за 5–6 суток, а в центральной транзитной зоне почти вдвое быстрее; НГ – мелководный

водоем с интенсивным ветровым перемешиванием водных масс, разнообразными внутриводоемными процессами биогидрохимической трансформации; велико влияние Балтийского моря, которое сказывается на изменении солености и температуры воды, изменениях уровня воды и структуры биологических сообществ; НГ – район с высоким уровнем техногенной нагрузки на окружающую среду; в периоды штормовых нагонов на экосистему НГ оказывает краткосрочное влияние комплекс водозащитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений. Вследствие совместного действия перечисленных факторов Невской губе свойственна чрезвычайно высокая пространственно-временная изменчивость гидрохимических и гидробиологических характеристик и показателей качества воды.

Вислинский залив (ВЗ) расположен в юго-восточной части побережья Балтийского моря в глубине Гданьского залива (рис. 1, б). Залив представляет собой узкую, вытянутую вдоль берега лагуну. По геоморфологическим и гидрологическим признакам ВЗ можно отнести к лагунным экосистемам «полукрытого» типа (по другой классификации – к эстуариям морского типа). Площадь водного зеркала российской части акватории залива составляет около 473 км<sup>2</sup> (~ 56 %), а суммарная площадь – 838 км<sup>2</sup>. Объем котловины ВЗ – около 2,3 км<sup>3</sup>, максимальная глубина – 5,2 м, средняя – 2,7 м. От Гданьского залива Балтийского моря ВЗ отделен песчаной косой и соединяется с ним узким Балтийским проливом шириной 400 м и глубиной 8–12 м. Несмотря на свои небольшие размеры, пролив играет существенную роль в



а)



б)

Рис. 1. Географическое положение Невской губы (а) и Вислинского залива (б) Балтийского моря [The Diversity..., 2017]

Fig. 1. Geographical location of the Neva Bay (а) and the Vistula Lagoon (б) of the Baltic Sea [The Diversity..., 2017]

формировании структуры течений, водного и солевого баланса ВЗ, процессах обмена биогенными веществами между Вислинским и Гданьским заливами.

Гидрологический режим ВЗ формируется в результате совместного влияния нескольких факторов. Наиболее важными из них являются метеорологические условия, водообмен с Балтийским морем, поступление речных вод и мелководность залива. Отнесение ВЗ к лагунным системам «полуоткрытого» типа (морским эстуариям) обусловлено интенсивным притоком морских вод на фоне относительно слабого речного стока. Нагонные явления и активное поступление морских вод в залив связаны с фронтальным положением Балтийского пролива относительно преобладающих ветров западных направлений.

Материковый сток в ВЗ составляет около  $3,6 \text{ км}^3/\text{год}$ . Показатель водообмена для ВЗ по общему стоку – 8,9. Это примерно в 7–7,5 раза меньше, чем в НГ.

Ежегодно в ВЗ поступают большие объемы различных форм соединений азота и фосфора [Witek et al., 2010]. Залив является аккумулятором значительного количества осадочных, растворенных и взвешенных веществ, в том числе и загрязняющих. Поэтому его экосистема очень уязвима и чувствительна к процессам эвтрофикации.

Модели экосистем НГ и ВЗ построены на одних и тех же методологических принципах, однако имеют разную структуру, разное количество модельных переменных и эмпирических параметров. Вопросы разработки структуры моделей, подготовки исходных данных для выполнения расчетов и всесторонней проверки имитационных математических моделей для исследования процессов в экосистемах НГ и ВЗ подробно рассмотрены ранее в ряде работ [Подгорный, 2003, 2018; Podgorny, Leonov, 2013a, b, 2015; Подгорный, Дмитриева, 2022]. Настройка модели НГ и последующие модельные расчеты осуществлены для периода 1984–1987, а модели ВЗ – для периода 1998–2000 гг.

Имитационные модели экосистем НГ и ВЗ включают в себя несколько базовых блоков [Подгорный, 2003, 2018; Podgorny, Leonov, 2013a]. Основным структурным компонентом моделей является биогидрохимический блок. Для экосистемы ВЗ он состоит из двух частей: «Планктонного блока» и блока «Бентос». При выполнении модельных расчетов планктонный и бентосный блоки модели используют одновременно. Моделирование процессов трансформации биогенных веществ в заливе прове-

дено совместно для водной среды и верхнего (деятельного) слоя донных отложений. В модели экосистемы НГ используется «Планктонный блок», а все процессы описываются только для водной среды. Моделирование позволяет количественно исследовать механизмы процессов биогидрохимической трансформации: соединений С, N, P и Si в экосистеме ВЗ; соединений N и P в экосистеме НГ. Обе модели позволяют изучать особенности пространственно-временной динамики растворенного в воде кислорода. Моделирование дает возможность учесть взаимодействие компонентов экосистемы при совместном воздействии как природных, так и антропогенных факторов. Модель экосистемы НГ содержит 17 переменных состояния и 58 настраиваемых эмпирических параметров, а модель экосистемы ВЗ – 60 переменных и 330 параметров.

При моделировании экосистемы НГ для каждого года все модельные расчеты проводили с момента (даты) полного очищения губы ото льда и до 31 октября, а для ВЗ – для периода с 1 января по 31 декабря. Шаг вычислений по времени составлял 0,1 сут. Начальные значения переменных планктонного и бентосного блоков имитационной модели ВЗ при проведении процедур оптимизации (поиска параметров) задавали или по данным многолетних наблюдений, или путем экспертных оценок. Если использовали второй вариант задания начальных условий, то для поиска их уточненных значений, так же как и для других эмпирических параметров модели, выполняли все процедуры оптимизации.

Кроме начальных значений модельных переменных в моделях экосистем НГ и ВЗ необходимо задать начальные значения ряда других переменных: концентрации хлорофилла  $a$   $Chl_a$  и глубины видимости белого диска  $Z_{White}$ . Во-первых, эти значения необходимы для расчета коэффициента  $\mathcal{E}_{ShortWave}$  – экстинкции коротковолновой солнечной радиации. Во-вторых, они служат дополнительными переменными, по которым имеются данные непосредственных наблюдений. Эти данные использованы при построении и расчете значений целевой функции в процедурах оптимизации (калибровки) модели. Для расчетов  $\mathcal{E}_{ShortWave}$  в моделях используется оптический блок, который имеет одинаковую структуру для обеих моделей, но разные наборы настраиваемых эмпирических параметров.

Диапазоны изменения всех эмпирических параметров имитационной модели в процедурах оптимизации для всех рассматриваемых лет заданы одинаковыми. Начальные значения

параметров во всех калибровочных расчетах взяты в середине соответствующего диапазона изменения каждого параметра. Таким образом, начальные (стартовые) значения параметров во всех численных экспериментах были одинаковыми.

#### Математическая формулировка задачи оптимизации

Имитационные модели экосистем Невской губы и Вислинского залива Балтийского моря использованы в локальном приближении (т. е. при отсутствии адвекции и диффузионного переноса). В общем виде такие модели могут быть записаны в виде систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений [Подгорный, 2003]:

$$dC_n/dt = F_n(\vec{p}, t, C_1, \dots, C_n), (n = \overline{1, N}), \quad (1)$$

которые описывают процессы трансформации веществ и динамику биотических компонентов экосистемы. Здесь  $C_n$  – значения концентраций/биомасс компонентов экосистемы,  $F_n$  – оператор, описывающий функциональные выражения связей между компонентами экосистемы,  $N$  – число переменных в модели,  $t$  – время,  $\vec{p}$  – множество эмпирических параметров модели. Численное решение системы (1) выполняли методом Рунге – Кутты 4-го порядка точности в модификации Гилла [Подгорный, 2003]. Вычисленные значения модельных переменных использовали для расчета значений целевой функции в процессе решения оптимизационной задачи.

Математическая формулировка задачи оптимизации состоит в следующем. Допустим, что на данном множестве  $P$   $k$ -мерного евклидова пространства  $E^k$  существует некоторая точка  $\vec{p}_m$  (некоторый оптимальный набор  $k$  параметров), в которой целевая функция  $f(\vec{p})$  достигает своего минимального значения на множестве  $P$ , то есть

$$f(\vec{p}_m) = \min_{\vec{p} \in P} (f(\vec{p})).$$

Решение задачи определения неизвестных параметров имитационной модели состоит в том, чтобы только на основе вычисления значений целевой функции найти оценку  $\vec{p}_c$  точки  $\vec{p}_m$  с некоторой наперед заданной точностью  $\varepsilon$  так, чтобы обеспечить выполнение условия сходимости:  $|f(\vec{p}_c) - f(\vec{p}_m)| \leq \varepsilon$ . Целевая функция обычно не может быть выражена аналитически. Ее свойства исследователю заранее неизвестны.

Множество значений векторной переменной  $\vec{p}$  ограничено множеством допустимых значений  $P \subset E^k$ . Оно образовано ограничениями. В практике экологического моделирования обычно рассматривают оптимизационные задачи минимизации с простыми ограничениями в виде неравенств. В таком случае множество  $P$  имеет следующий вид:  $P = \{\vec{p} \in E^k : a_j \leq p_j \leq b_j, j = \overline{1, k}\}$ , где  $a_j$  и  $b_j$  – заданные величины, которые определяют нижнюю и верхнюю границы изменения каждого параметра модели  $p_j, j = \overline{1, k}$ . В некоторых случаях дополнительно необходимо обеспечить соблюдение определенных соотношений между значениями параметров.

Решение оптимизационной задачи проведено в рамках класса методов «нулевого порядка» (или методов прямого поиска) [Рыков, 1993; Finley et al., 1998]. Их применение не требует дифференцируемости целевой функции и/или аналитического ее задания. Нужно только иметь возможность вычислять значения целевой функции  $f(\vec{p})$  в произвольных точках параметрического пространства.

В качестве целевой функции и показателя адекватности модели использовали критерий Тейла [Theil, 1971]. Его значение зависит от множества параметров модели и меняется от нуля до единицы (или от 0 до 100 %) [Подгорный, 2003; Podgornyi, Leonov, 2015; Подгорный, Дмитриева, 2022].

#### Описание алгоритмов прямого поиска

Для решения оптимизационной задачи оценивания значений параметров имитационной модели в данной работе использовали двухэтапный алгоритм прямого поиска [Подгорный, 2003; Podgornyi, Leonov, 2015]. На первом этапе применяли алгоритм случайного поиска [Törn, Zilinskas, 1989; Лесин, Лисовец, 1998]. Его реализацию осуществляли в пределах всего предварительно заданного пространства параметров. Основная задача этого этапа – поиск возможной области существования глобального минимума целевой функции в заданном параметрическом пространстве. В данной работе использовали процедуру случайного поиска с возвратом при неудачном шаге [Подгорный, 2003]. На втором этапе выполняли локальный поиск. Для этого использовали модифицированный симплексный метод Нелдера – Мида [Nelder, Mead, 1965; Химмельблау, 1975; Рыков, 1993; Лесин, Лисовец, 1998]. Задача локального поиска – уточнить положение минимума целевой функции, которое было найдено на первом этапе работы алгоритма.

Форма начального симплекса мало влияет на стратегию поиска и скорость сходимости итерационного процесса и может быть выбрана произвольным образом. Подробное описание и вычислительные особенности применения алгоритма для второго этапа приведены в работе [Подгорный, 2003].

*Описание метода оценки чувствительности моделей к изменениям значений эмпирических параметров*

Исследование чувствительности моделей к изменению значений тех или иных параметров для НГ и ВЗ проводили по одной и той же методике [Podgornyi, Leonov, 2015; Подгорный, Дмитриева, 2022]. Для каждого модельного года (1998–2000 гг. – для модели ВЗ; 1984–1987 гг. – для модели НГ) проводили по 25 вычислительных экспериментов. В качестве меры чувствительности модели рассматривали отношение суммы средних значений коэффициентов временной вариации по всем переменным модели к коэффициенту вариации каждого параметра модели. Таким образом, мера чувствительности модели к изменению значения того или иного параметра представляет собой относительную величину.

**Результаты и обсуждение**

*Характеристики алгоритмов поиска параметров. Оценка степени трудоемкости использованных методов оптимизации*

Для имитационной модели НГ суммарное число итераций в процедуре случайного поиска менялось от 19 360 до 97 848. В среднем для этапа случайного поиска требовалось от 30 838 до 58 014 итераций. Для этапа уточняющего локального поиска с использованием симплексного метода Нелдера – Мида требовалось от 121 до 8357 итераций (в среднем от 3835 до 4645). Таким образом, для решения поставленной

оптимизационной задачи в общей сложности требовалось от 19 726 до 106 205 итераций (в среднем от 35 044 до 62 659).

Для имитационной модели ВЗ на этапе реализации алгоритма случайного поиска число итераций изменялось от 46 694 до 146 483. В среднем на этом этапе требовалось от 87 819 до 99 127 итераций. Для второго этапа – локального поиска – число итераций менялось от 2 до 21 (в среднем 6–7 итераций). Таким образом, в общей сложности требовалось от 46 697 до 146 494 итераций (в среднем от 87 825 до 99 133).

Приведенные данные показывают, что даже в том случае, когда для выполнения процедур оценки параметров модели используется одномерный вариант имитационной модели – только биогидрохимический ее блок, решение поставленной оптимизационной задачи требует проведения интенсивных вычислений с большим количеством итераций и затрат машинного времени. Повышение качества и увеличение количества данных наблюдений, их взаимная согласованность, соблюдение требования синхронности проведения съемок существенно снижает неопределенности в оценках значений целевой функции и, следовательно, напрямую влияет на эффективность реализации вычислительных алгоритмов.

*Статистические характеристики для критериев Тейла*

В табл. 1 и 2 приведены статистические характеристики для критериев Тейла, которые получены в результате осреднения по отдельным переменным модели экосистемы НГ и ВЗ. Внутригодовая динамика компонентов моделей, которые соответствовали наилучшим решениям оптимизационной задачи, рассмотрена ранее в работах [Podgornyi, Leonov, 2013b; Подгорный, Дмитриева, 2022].

Приведенные статистические характеристики критериев Тейла  $f(\bar{p})$  для моделей экосистем НГ и ВЗ позволяют сделать общий вывод

Таблица 1. Статистические характеристики для критериев Тейла  $f(\bar{p})$ , осредненных по отдельным переменным имитационной модели Невской губы

Table 1. Statistical characteristics for Theil criteria  $f(\bar{p})$  averaged over individual variables of the Neva Bay simulation model

Год Year	$f(\bar{p})_{min}$	$f(\bar{p})_{max}$	$f(\bar{p})_{max} - f(\bar{p})_{min}$	$\overline{f(\bar{p})}$	CV, %
1984	21,585	24,564	2,979	23,837	3,428
1985	21,996	23,655	1,659	22,481	1,983
1986	25,783	29,278	3,495	27,514	3,979
1987	26,294	28,413	2,119	27,445	2,133

Таблица 2. Статистические характеристики для критериев Тейла  $f(\bar{p})$ , осредненных по отдельным переменным имитационной модели Вислинского залива

Table 2. Statistical characteristics for Theil criteria  $f(\bar{p})$  averaged over individual variables of the Vistula Lagoon simulation model

Год Year	$f(\bar{p})_{min}$	$f(\bar{p})_{max}$	$f(\bar{p})_{max} - f(\bar{p})_{min}$	$\overline{f(\bar{p})} \pm \sigma_{f(\bar{p})}$	CV, %
1998	16,855	17,831	0,976	17,405 ± 0,189	1,084
1999	18,186	19,008	0,822	18,539 ± 0,195	1,051
2000	16,272	17,346	1,074	16,764 ± 0,269	1,602

о том, что в основном по всем переменным имитационных моделей получены достаточно хорошие соответствия результатов моделирования данным непосредственных наблюдений. Это следует из рассмотрения средних значений критериев  $f(\bar{p})$  для модельных переменных и диапазонов их изменения, а также величин коэффициентов вариации.

Расчеты критериев Тейла по отдельным переменным модели НГ для периода с 1984 по 1987 г. позволили оценить, по каким именно переменным модели и почему процедуры поиска параметров дают худшие результаты. Анализ полученных данных показал, что это относится в основном к биомассам фитопланктона, простейших организмов и зоопланктона, выраженным в единицах азота и фосфора –  $B_{Algae}^N$ ,  $B_{Algae}^P$ ,  $B_{Protozoa}^N$ ,  $B_{Protozoa}^P$ ,  $B_{Zoopl}^N$ ,  $B_{Zoopl}^P$ ; в отдельных случаях – к концентрациям соединений биогенных элементов  $C_{DIP}$ ,  $C_{DOP}$ ,  $C_{NO_2^-}$  (табл. 3).

По другим переменным имитационной модели соответствие результатов моделирования данным непосредственных наблюдений находилось в пределах 20–25 %. Это как раз и указывает на то, что основные процессы трансформации соединений N и P, динамики растворенного в воде  $O_2$  воспроизводятся имитационной моделью НГ вполне корректно.

Дальнейший анализ данных наблюдений, результатов моделирования и исследование балансов соединений биогенных элементов показали, что основная причина интенсивного развития гетеротрофных микроорганизмов в водах НГ – значительное поступление аллохтонного органического вещества из внешних источников. Таким образом, роль бактериопланктона в трансформации биогенных веществ в НГ велика, а роль фито- и зоопланктона в этих процессах существенно ниже. По-видимому, именно с этим могут быть связаны ос-

Таблица 3. Статистические характеристики для критериев Тейла  $f(\bar{p})$  по отдельным переменным имитационной модели Невской губы

Table 3. Statistical characteristics for Theil criteria  $f(\bar{p})$  for individual variables of the Neva Bay simulation model

Переменная модели Model variable	$f(\bar{p})_{min}$	$f(\bar{p})_{max}$	$\overline{f(\bar{p})}$
$B_{Algae}^N$	28,3–47,9	33,0–50,0	30,8–49,3
$B_{Algae}^P$	30,4–43,9	35,3–49,9	32,6–48,5
$B_{Protozoa}^N$	21,4–28,7	26,2–39,3	22,6–37,1
$B_{Protozoa}^P$	21,2–28,6	26,4–39,1	22,6–37,4
$B_{Zoopl}^N$	27,2–60,6	39,2–63,4	35,4–63,0
$B_{Zoopl}^P$	25,8–54,1	39,1–63,5	35,3–62,6
$C_{NO_2^-}$	15,5–17,3	19,3–28,5	16,6–20,6
$C_{DOP}$	13,8–17,2	18,0–29,5	15,7–21,6
$C_{DIP}$	12,6–31,5	21,5–35,1	18,3–32,6

новые причины достаточно высоких ошибок в воспроизведении сезонного хода таких переменных модели, как  $B_{Algae}^N$ ,  $B_{Algae}^P$ ,  $B_{Protozoa}^N$ ,  $B_{Protozoa}^P$ ,  $B_{Zoopl}^N$ ,  $B_{Zoopl}^P$ . Их динамика, в отличие от динамики  $B_{Bacteria}^N$ ,  $B_{Bacteria}^P$ , в большей степени связана с пассивным переносом водой. Она слабо зависит от циклов биогенных элементов, их интенсивности и именно поэтому недостаточно хорошо воспроизводится с помощью имитационной модели.

Средние значения критерия  $f(\bar{p})$  для переменных модели ВЗ обычно были менее 20 % и только в отдельных случаях находились в пределах 20–25 %. Вместе с тем следует обратить внимание на более сильные расхождения между модельными расчетами и данными наблюдений для концентраций  $C_{NH_4^+}$ ,  $C_{NO_2^-}$ ,  $C_{NO_3^-}$ . По этим компонентам критерий  $f(\bar{p})$  может достигать значений 27–32 %. Скорее всего, это связано с качеством исходных данных наблюдений, которые были использованы для проверки адекватности модели.

Полученные данные свидетельствуют о том, что предлагаемые алгоритмы поиска параметров для биогидрохимического блока имитационных моделей НГ и ВЗ в обоих случаях позволили в целом успешно решить поставленную оптимизационную задачу. Выполненные расчеты показали, что предлагаемые алгоритмы оптимизации достаточно эффективны, надежны и обеспечивают статистическую сходимость получаемых результатов.

*Результаты выполнения процедур по оценке параметров имитационных моделей. Статистические характеристики изменчивости найденных значений параметров*

После проведения ряда предварительных вычислительных экспериментов было установлено, что значения коэффициентов смертности, которые в модели позволяют регулировать смертность гидробионтов в зависимости от условий питания, могут быть приняты равными нулю. Концентрации пищевых субстратов для питания планктонных и бентосных организмов в НГ и ВЗ достаточно велики. Поэтому значимого пищевого лимитирования роста организмов нет. Следовательно, условия питания не являются существенным регулятором процессов отмирания гидробионтов. Полученный результат позволяет не только уменьшить количество настраиваемых эмпирических параметров, но также оптимизировать структуру моделей и в определенной степени уменьшить их структурную неопределенность.

Данные моделирования для НГ показали, что в подавляющем числе случаев коэффициенты вариации для рядов разных параметров не превышают 35 %. Однако для коэффициентов температурных функций, а в ряде случаев также и для коэффициентов смертности и экскреции коэффициенты вариации могут превышать 40–50 %.

Значения для отдельных параметров биогидрохимического блока имитационных моделей ВЗ и НГ, полученные в результате выполнения процедур оптимизации, приведены в табл. 4 и 5. Дать всестороннюю оценку согласованности модельных параметров с оценками скоростей биогеохимических процессов, основанных на экспериментальных данных, на данном этапе не представляется возможным. В полевых условиях такие экспериментальные измерения (измерения параметров «под конкретную модель») ни в ВЗ, ни в НГ не проводятся.

В результате проведения вычислительных экспериментов установлено также, что в значительном количестве случаев (~20 %) существуют статистически достоверные межгодовые различия между средними и/или дисперсиями значений тех или иных параметров, причем в разные годы могут достоверно отличаться статистические характеристики разных параметров. Таким образом, для модели экосистемы НГ использовать одни и те же значения модельных параметров для разных лет при проведении вычислительных экспериментов нельзя.

Данные моделирования для ВЗ свидетельствуют о том, что в подавляющем числе случаев коэффициенты вариации для рядов разных параметров не превышают 15 %. Однако для коэффициентов  $\delta_{N_{detr \rightarrow DON}}$ ,  $\delta_{Si_{detr \rightarrow DOSi}}$ , которые характеризуют порядок ферментативной реакции при описании процесса нелинейного разложения детрита и превращения детрита в растворенное органическое вещество (DON, DOSi), коэффициенты вариации могут быть существенно выше. Так, для коэффициента  $\delta_{N_{detr \rightarrow DON}}$  коэффициенты вариации для периода 1998–2000 гг. менялись от 31 до 39 %, а для коэффициента  $\delta_{Si_{detr \rightarrow DOSi}}$  – от 51 до 75 %. Значительной может быть изменчивость и для коэффициентов, которые используются при расчете скорости изменения концентрации растворенного в воде органического азота, фосфора и кремния, обусловленного процессами экскреции. Коэффициенты вариации для указанных эмпирических параметров модели могут меняться в пределах от 30 до 65 %. Высокая изменчивость параметров связана с постоянно высоким уровнем содержания растворенных органических веществ (POB) в воде ВЗ.

Таблица 4. Наилучшие наборы некоторых значений оцениваемых параметров для биогидрохимического блока имитационной модели Вислинского залива Балтийского моря (период 1998–2000 гг.)

Table 4. The best sets of some values of the estimated parameters for the biogeochemical block of the simulation model of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea (period 1998–2000)

№ параметра Parameter No.	Название параметра Parameter name	Единицы измерения Units	Годы Years		
			1998	1999	2000
1	$(Uptake_{max})_{Bacteria}$	сут <sup>-1</sup>	6,36456E-01	4,92814E-01	5,78567E-01
2	$(Uptake_{max})_{Bacill}$	сут <sup>-1</sup>	3,08199E+00	2,43729E+00	2,54462E+00
3	$(Uptake_{max})_{Cyan}$	сут <sup>-1</sup>	2,38170E+00	2,14304E+00	1,90549E+00
4	$(Uptake_{max})_{Chlor}$	сут <sup>-1</sup>	3,04055E+00	2,62055E+00	2,79496E+00
5	$(Uptake_{max})_{Protozoa}$	сут <sup>-1</sup>	2,89965E-01	2,84112E-01	2,62334E-01
6	$(Uptake_{max})_{HerbZoopl}$	сут <sup>-1</sup>	4,52177E-01	5,80721E-01	5,36575E-01
7	$(Uptake_{max})_{PredZoopl}$	сут <sup>-1</sup>	1,62989E-01	1,46256E-01	1,70227E-01
8	$(Uptake_{max})_{MacroPh}$	сут <sup>-1</sup>	9,70142E-01	8,02816E-01	7,96625E-01
9	$(Uptake_{max})_{Chiron}$	сут <sup>-1</sup>	1,21073E-01	1,12011E-01	1,09193E-01
10	$(Uptake_{max})_{Oligoch}$	сут <sup>-1</sup>	5,48060E-01	5,52479E-01	5,50020E-01
11	$(Uptake_{max})_{Polych}$	сут <sup>-1</sup>	4,89951E-01	4,48702E-01	4,38001E-01
12	$(Uptake_{max})_{Mollusca}$	сут <sup>-1</sup>	1,47695E-01	1,42298E-01	1,58705E-01
13	$(Uptake_{max})_{Misidae}$	сут <sup>-1</sup>	8,25141E-02	8,65474E-02	8,74198E-02
194	$TransfR_{N\_detr \rightarrow DON}^*$	сут <sup>-1</sup>	1,31002E-04	1,48499E-04	1,27149E-04
196	$TransfR_{NH_4^+ \rightarrow NO_2^-}^*$	сут <sup>-1</sup>	2,34117E-01	2,13379E-01	2,82105E-01
197	$TransfR_{NO_2^- \rightarrow NO_3^-}^*$	сут <sup>-1</sup>	2,21641E-01	2,16506E-01	2,68389E-01
198	$TransfR_{NO_3^- \rightarrow N_2}^*$	сут <sup>-1</sup>	2,19429E+00	1,70102E+00	2,43760E+00
199	$TransfR_{P\_detr \rightarrow DOP}^*$	сут <sup>-1</sup>	6,71348E-04	7,43640E-04	6,93334E-04
201	$TransfR_{DOP \rightarrow DIP}^*$	сут <sup>-1</sup>	1,49202E-03	1,36282E-03	1,73562E-03
202	$TransfR_{Si\_detr \rightarrow DOSi}^*$	сут <sup>-1</sup>	1,53209E-04	1,32452E-04	1,32882E-04
204	$TransfR_{DOSi \rightarrow DISi}^*$	сут <sup>-1</sup>	1,51468E-03	1,41167E-03	1,47626E-03
265	$U_{N\_detr}^{sed}$	сут <sup>-1</sup>	1,40609E-01	1,41019E-01	1,41855E-01
266	$U_{P\_detr}^{sed}$	сут <sup>-1</sup>	3,68128E-01	3,69385E-01	4,21623E-01
267	$U_{Si\_detr}^{sed}$	сут <sup>-1</sup>	1,33551E-01	1,41648E-01	1,15385E-01
268	$U_{N\_detr\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	2,33008E-04	2,32331E-04	2,34135E-04
269	$U_{P\_detr\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	1,34006E-05	1,28779E-05	1,30633E-05
270	$U_{Si\_detr\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	5,18452E-04	5,43598E-04	4,96651E-04
271	$U_{DOC\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	1,41007E-06	1,35195E-06	1,34219E-06
272	$U_{NH_4^+\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	4,34747E-05	5,68333E-05	5,45507E-05
273	$U_{NO_3^-\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	2,73541E-05	2,06782E-05	2,56563E-05

Окончание табл. 4  
Table 4 (continued)

№ параметра Parameter No.	Название параметра Parameter name	Единицы измерения Units	Годы Years		
			1998	1999	2000
274	$U_{O_2\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	1,58201E-04	1,52663E-04	1,45796E-04
275	$U_{DIP\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	1,97420E-08	1,55005E-08	1,78824E-08
276	$U_{DISi\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	8,99494E-06	8,75573E-06	7,04096E-06
277	$U_{O_2\_sed}^{resusp}$	сут <sup>-1</sup>	9,19668E-05	8,74732E-05	8,83247E-05

Таблица 5. Наилучшие наборы некоторых значений оцениваемых параметров для биогидрохимического блока имитационной модели Невской губы Финского залива (период 1984–1987 гг.)

Table 5. The best sets of some values of the estimated parameters for the biogeochemical block of the simulation model of the Neva Bay of the Gulf of Finland (period 1984–1987)

№ параметра Parameter No.	Название параметра Parameter name	Единицы измерения Units	Годы Years			
			1984	1985	1986	1987
25	$(Uptake_{max})_{Bacteria}$	сут <sup>-1</sup>	1,08571	1,06731	1,08277	1,17717
26	$(Uptake_{max})_{Algae}$	сут <sup>-1</sup>	1,00035	1,74041	0,96112	2,84757
27	$(Uptake_{max})_{Protozoa}$	сут <sup>-1</sup>	0,47637	0,55997	0,75432	0,69218
28	$(Uptake_{max})_{Zoopl}$	сут <sup>-1</sup>	0,20943	0,18266	0,23413	0,17473
53	$TransfR_{N\_detr \rightarrow DON}^*$	сут <sup>-1</sup>	0,00122	0,00167	0,00235	0,00244
54	$TransfR_{NH_4^+ \rightarrow NO_2^-}^*$	сут <sup>-1</sup>	0,00229	0,00192	0,00146	0,00379
55	$TransfR_{NO_2^- \rightarrow NO_3^-}^*$	сут <sup>-1</sup>	0,01692	0,02061	0,02995	0,02736
56	$TransfR_{P\_detr \rightarrow DOP}^*$	сут <sup>-1</sup>	0,15078	0,18586	0,21556	0,19649
57	$TransfR_{DOP \rightarrow DIP}^*$	сут <sup>-1</sup>	0,00131	0,00134	0,00119	0,00221

На этом фоне органическое вещество, которое образуется в процессе экскреции органического вещества гидробионтами, по уровню оказывается менее значимым фактором в картине общей динамики ПОВ. В этом случае частные «вклады» в средневзвешенное значение критерия Тейла, которые рассчитываются по модельным компонентам DON, DOP, DOSi, будут мало меняться в процессе выполнения процедур оптимизации.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали, что для 85 % исследованных параметров модели экосистемы ВЗ межгодовые различия их значений недостоверны на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Для 8 % параметров на том же уровне значимости межгодовые различия оказались достоверными. Для оставшихся 7 % параметров модели межгодовые различия их значений достоверны на уровне значимости и достоверно не отличаются на

уровне значимости  $\alpha = 0,01$ . Полученные результаты показали, что примерно в 8–15 % от всего исследованного набора эмпирических параметров имитационной модели экосистемы ВЗ межгодовые отличия значений параметров статистически достоверны или могут быть достоверными. Проведенный анализ свидетельствует о том, что следует с большой осторожностью использовать одни и те же значения модельных параметров для разных лет при проведении вычислительных экспериментов.

#### Исследование чувствительности моделей к изменению параметров и начальных условий

Оценка чувствительности математической модели к изменению значений параметров – важный этап ее построения и отладки. Он дает возможность отобрать среди всего набора

эмпирических параметров наиболее важные и значимые для функционирования всей системы. Примеры расчетов значений коэффициентов чувствительности для моделей экосистем НГ и ВЗ показаны на рис. 2. Чем более «чувствительна» модель к изменениям значений того или иного параметра, тем сильнее будет «выброс» значения коэффициента чувствительности на графике.

Расчеты коэффициентов чувствительности для модели экосистемы НГ показали, что более высокая чувствительность модели к изменению значений параметров в разные годы связана с разными параметрами. Таким образом, нельзя однозначно указать какую-либо «ведущую» группу параметров, определяющую качество настройки модели. Тем не менее можно отметить, что наиболее важными являются параметры для функций температурной коррекции скоростей потребления веществ, а также коэф-

фициенты, которые используются при расчете скорости отмирания гидробионтов. Именно на эти коэффициенты, на их правильную оценку следует обращать особое, первостепенное внимание.

Расчеты коэффициентов чувствительности для модели экосистемы ВЗ показали, что более высокая чувствительность модели к изменению значений параметров в разные годы связана с одними и теми же группами параметров. Во-первых, это относится к значениям коэффициентов смертности всех рассматриваемых в модели бентосных организмов (хируномид, олигохет, полихет, моллюсков и мизид) для цикла азота. Во-вторых, достаточно высока чувствительность модели к изменению значения коэффициента, который используется при расчете скорости трансформации азота в составе детрита в аммонийный азот в верхнем слое донных отложений (ДО). В-третьих, следует

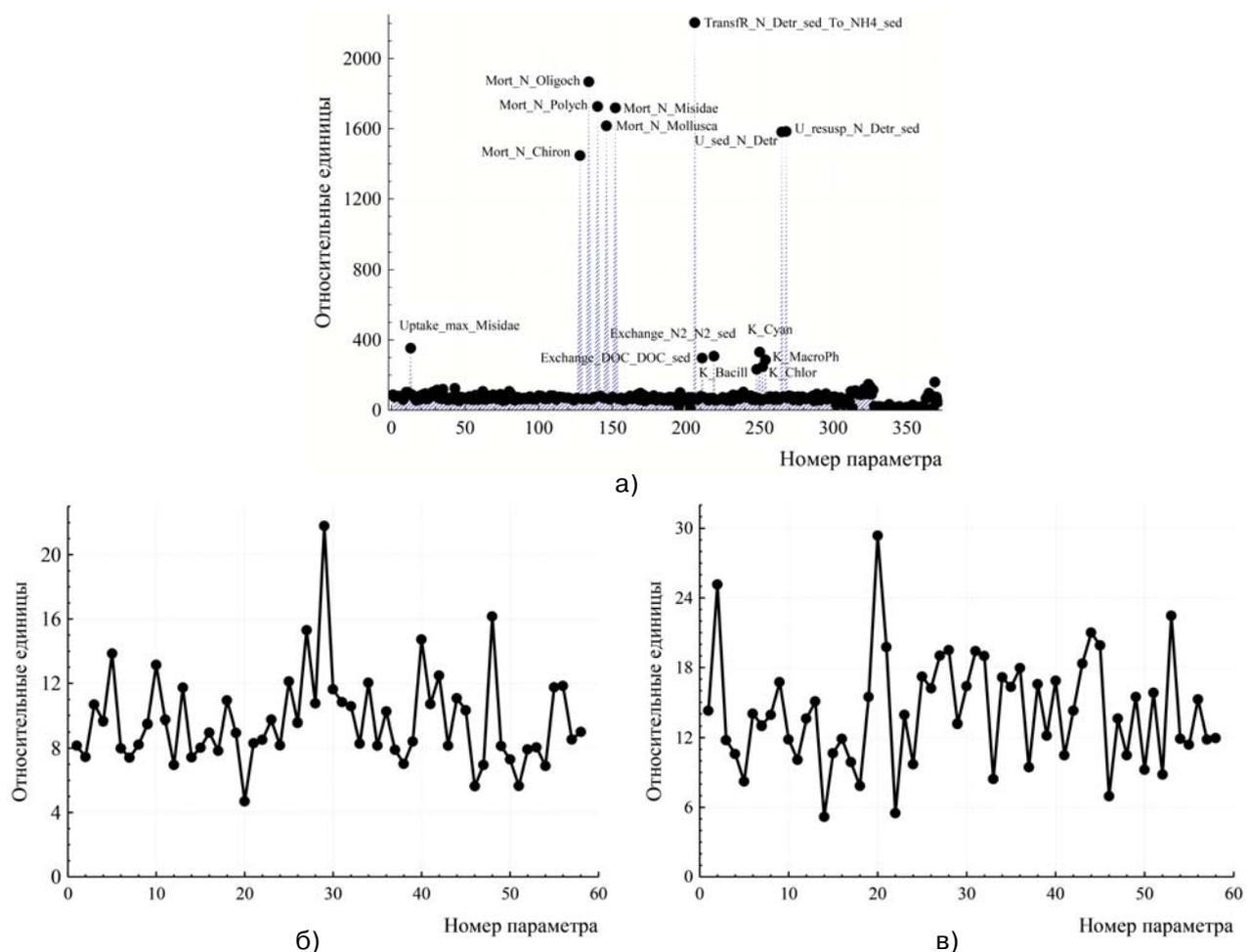


Рис. 2. Коэффициенты чувствительности модели (в относительных единицах) к изменению значений модельных параметров: а – Вислинский залив, 1999 г.; б, в – Невская губа: б – 1984 г.; в – 1986 г.

Fig. 2. Coefficients (in relative units) of model sensitivity to changes in the values of model parameters: а – Vistula Lagoon, 1998; б, в – Neva Bay: б – 1984; в – 1986

обратить внимание на чувствительность модели к параметрам, которые характеризуют скорости обменных процессов на границе вода-ДО (в частности, для растворенного органического углерода и свободного азота). В-четвертых, модель чувствительна к изменению значений коэффициентов, которые используются при расчете концентрации растворенного в воде кислорода (для разных систематических групп фитопланктона и макрофитов). В-пятых, высока чувствительность модели по отношению к параметрам, которые характеризуют скорости седиментации взвесей и ресуспензии донных отложений (в первую очередь это относится к азоту в составе детрита).

Можно обратить внимание на то, что более сильные расхождения между данными моделирования и данными наблюдений для аммонийного азота, азота нитритов и нитратов могут быть связаны еще и с высокой чувствительностью модели к изменению значений коэффициентов при описании процессов в цикле азота.

Таким образом, можно указать на «ведущие» группы параметров, которые во многом определяют качество настройки модели. Однако для этого желательно иметь также и оценки этих величин на основании данных натуральных или экспериментальных наблюдений.

Структура имитационной модели для НГ гораздо более простая по сравнению с моделью экосистемы ВЗ. По всей видимости, группы «ведущих» параметров, которые наиболее сильно влияют на чувствительность модели, во многом зависят от структуры модели. Кроме того, параметрическая чувствительность модели может быть обусловлена межгодовыми изменениями условий функционирования экосистемы и последующими за этим перестройками ее структуры и перераспределениями потоков веществ внутри экосистемы.

Модельными экспериментами было установлено, что чувствительность моделей к начальным значениям переменных имитационных моделей, которые задавали по осредненным данным наблюдений или путем экспертных оценок, в целом невысока.

## **Заключение**

Разработка методов количественной оценки значений параметров математических моделей, которые используют при описании физико-химических и биологических процессов в водных экосистемах, является одной из наиболее трудных и принципиальных проблем математического моделирования. В современных моделях водных экосистем количество

эмпирических параметров может достигать нескольких сотен. Поэтому решение задачи поиска наиболее оптимальных значений параметров (калибровки моделей) возможно только с помощью разных алгоритмов оптимизации.

По-прежнему актуальным остается требование к качеству и количеству данных непосредственных наблюдений. При этом важно обеспечить взаимную согласованность данных, соблюдение требования синхронности проведения съемок. Выполнение этих условий позволит существенно снизить неопределенности в оценках значений целевой функции, что приведет к более эффективному и устойчивому использованию вычислительных алгоритмов.

Результаты настоящей работы показали, что предлагаемые алгоритмы поиска параметров для биогидрохимического блока имитационных моделей НГ и ВЗ позволяют в целом успешно решать оптимизационную задачу даже в условиях недостаточного объема данных наблюдений и сравнительно высокой их временной изменчивости. Применяемые алгоритмы доказали свою эффективность, обеспечили надежность и статистическую сходимость получаемых результатов. Они универсальны и могут быть использованы также и для других моделей экосистем и географических объектов (озер, водохранилищ). Важная задача будущих исследований – проверить эффективность алгоритмов при использовании других метрик и критериев адекватности моделей.

Численные эксперименты с моделями позволили установить, что примерно в 8–15 % от всего исследованного набора эмпирических параметров имитационной модели экосистемы ВЗ и около 20 % – для модели НГ Финского залива межгодовые отличия значений параметров статистически достоверны или могут быть достоверны в зависимости от выбора уровня значимости. Поэтому при проведении сценарных расчетов и/или решении задач прогнозирования следует с большой осторожностью использовать одни и те же значения модельных параметров для разных лет даже для одной и той же водной экосистемы, не говоря уже о разных экосистемах. Полученный результат крайне важен. Он со всей определенностью свидетельствует о том, что даже если моделируемые системы имеют похожие морфометрические, гидрологические условия, сходную временную динамику развития гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов, то использование одних и тех же наборов значений модельных параметров может привести к существенным ошибкам при выполнении модельных расчетов.

Результаты сравнительного анализа показали, что для модели экосистемы ВЗ высокая чувствительность модели в разные годы была связана с одними и теми же группами параметров, а для НГ – с разными их комбинациями. Структура имитационной модели для НГ гораздо более простая по сравнению с моделью экосистемы ВЗ, хотя обе они и построены на одних и тех же методологических принципах. По всей видимости, группы «ведущих» параметров, которые наиболее сильно влияют на чувствительность модели, во многом зависят от структуры имитационной модели. Кроме того, значительное влияние могут оказывать существенные различия показателей водообмена в НГ и ВЗ. Изменения параметрической чувствительности моделей могут быть обусловлены также и межгодовыми изменениями условий функционирования экосистем и последующими за этим перестройками их структуры и перераспределениями потоков веществ внутри экосистемы. Рассмотрение этих непростых методических вопросов требует дополнительных исследований.

## Литература

- Лесин В. В., Лисовец Ю. П. Основы методов оптимизации. М.: Изд-во МАИ, 1998. 344 с.
- Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: ИВП РАН, 2018. 300 с.
- Подгорный К. А. Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2003. 328 с.
- Подгорный К. А. Математическая модель для изучения экосистемы Вислинского залива Балтийского моря. Часть 1. Теоретические основы и структура модели, методология подготовки исходных данных для выполнения расчетов. Калининград: АтлантНИРО, 2018. 271 с.
- Подгорный К. А., Дмитриева О. А. Математическое моделирование процессов трансформации соединений биогенных элементов в экосистеме Вислинского залива Балтийского моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 142–160. doi: 10.17076/lim1605
- Рыков А. С. Поисковая оптимизация. Методы деформируемых конфигураций. М.: Физматлит, 1993. 216 с.
- Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 515 с.
- Bennett N. D., Croke B. F. W., Guariso G., Guillaume J. H. A., Hamilton S. H., Jakeman A. J., Marsili-Libelli S., Newham L. T. H., Norton J. P., Perrin C., Pierce S. A., Robson B., Seppelt R., Voinov A. A., Fath B. D., Andreassian V. Characterising performance of environmental models // Environ. Model. Softw. 2013. Vol. 40. P. 1–20. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.09.011
- Finley J. R., Pinter J. D., Satish M. G. Automatic model calibration applying global optimization techniques // Environ. Model. Assess. 1998. Vol. 3. P. 117–126. doi: 10.1023/A:1019010822186
- Harmel R. D., Smith P. K., Migliaccio K. W., Chaubey I., Douglas-Mankin K. R., Benham B., Shukla S., Muñoz-Carpena R., Robson B. J. Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: a review and recommendations // Environ. Model. Softw. 2014. Vol. 57. P. 40–51. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.02.013
- Hipsey M. R., Gal G., Arhonditsis G. B., Carey C. C., Elliott J. A., Frassl M. A., Janse J. H., de Mora L., Robson B. J. A system of metrics for the assessment and improvement of aquatic ecosystem models // Environ. Model. Softw. 2020. Vol. 128. Art. 104697. doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104697.
- Jackson E. K., Roberts W., Nelsen B., Williams G. P., Nelson E. J., Ames D. P. Introductory overview: Error metrics for hydrologic modelling – a review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption // Environ. Model. Softw. 2019. Vol. 119. P. 32–48. doi: 10.1016/j.envsoft.2019.05.001
- Marsili-Libelli S. Parameter estimation of ecological models // Ecol. Model. 1992. Vol. 62. P. 233–258. doi: 10.1016/0304-3800(92)90001-U
- Marsili-Libelli S., Guerrizio S., Checchi N. Confidence regions of estimated parameters for ecological systems // Ecol. Model. 2003. Vol. 165. P. 127–146. doi: 10.1016/S0304-3800(03)00068-1
- Model sensitivity and uncertainty analysis // Water resources systems planning and management. UNESCO, 2005. P. 255–290.
- Nelder J. A., Mead R. A simplex method for function minimization // Comput. J. 1965. Vol. 7. P. 308–313. doi: 10.1093/comjnl/7.4.308
- Podgorny K. A., Leonov A. V. The use of a spatially heterogeneous simulation model for studying biotransformation processes of nitrogen and phosphorus compounds and the dynamics of oxygen dissolved in water in the ecosystem of Neva Bay, the Gulf of Finland: 1. Model description // Water Resources. 2013a. Vol. 40, no. 2. P. 170–180. doi: 10.1134/S0097807813020061
- Podgorny K. A., Leonov A. V. The use of a spatially heterogeneous simulation model for studying biotransformation processes of nitrogen and phosphorus compounds and the dynamics of oxygen dissolved in water in the ecosystem of Neva Bay, the Gulf of Finland: 2. Input data for calculations, modeling results, and their analysis // Water Resources. 2013b. Vol. 40, no. 3. P. 254–270. doi: 10.1134/S009780781303007X
- Podgorny K. A., Leonov A. V. Review of the current methods used to assess the values of coefficients, sensitivity, and adequacy of simulation models of aquatic ecosystems // Water Resources. 2015. Vol. 42, no. 4. P. 477–499. doi: 10.7868/S0321059615040124
- Steenbeek J., Buszowski J., Chagaris D., Christensen V., Coll M., Fulton E. A., Katsanevakis S., Lewis K. A., Mazaris A. D., Macias D., de Mutsert K., Oldford G., Pennino M. G., Piroddi C., Romagnoni G., Serpetti N., Shin Y.-J., Spence M. A., Stelzenmüller V. Making spatial-temporal marine ecosystem modelling better – a perspective // Environ. Model. Softw. 2021. Vol. 145. Art. 105209. doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105209

Subbey S. Parameter estimation in stock assessment modelling: caveats with gradient-based algorithms // *ICES J. Mar. Sci.* 2018. Vol. 75. P. 1553–1559. doi: 10.1093/icesjms/fsy044.

The Diversity of Russian estuaries and lagoons exposed to human influence / Ed. R. D. Kosyan. Switzerland, Springer, 2017. 270 p. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9

Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam: North-Holland, 1971. 474 p.

Törn A., Zilinskas A. Global optimization. Lectures notes in computer science. Berlin: Springer-Verlag, 1989. Vol. 350. 260 p.

Witek Z., Zalewski M., Wielgat-Rychert M. Nutrient stocks and fluxes in the Vistula lagoon at the end of the twentieth century. Slupsk-Gdynia, 2010. 186 p.

## References

Bennett N. D., Croke B. F. W., Guariso G., Guillaume J. H. A., Hamilton S. H., Jakeman A. J., Marsili-Libelli S., Newham L. T. H., Norton J. P., Perrin C., Pierce S. A., Robson B., Seppelt R., Voinov A. A., Fath B. D., Andreassian V. Characterising performance of environmental models. *Environ. Model. Softw.* 2013;40:1–20. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.09.011

Finley J. R., Pinter J. D., Satish M. G. Automatic model calibration applying global optimization techniques. *Environ. Model. Assess.* 1998;3:117–126. doi: 10.1023/A:1019010822186

Harmel R. D., Smith P. K., Migliaccio K. W., Chaudhary I., Douglas-Mankin K. R., Benham B., Shukla S., Muñoz-Carpena R., Robson B. J. Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: a review and recommendations. *Environ. Model. Softw.* 2014;57:40–51. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.02.013

Himmelblau D. Applied nonlinear programming. Moscow: Mir; 1975. 515 p. (In Russ.)

Hipsey M. R., Gal G., Arhonditsis G. B., Carey C. C., Elliott J. A., Frassl M. A., Janse J. H., de Mora L., Robson B. J. A system of metrics for the assessment and improvement of aquatic ecosystem models. *Environ. Model. Softw.* 2020;128:104697. doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104697

Jackson E. K., Roberts W., Nelsen B., Williams G. P., Nelson E. J., Ames D. P. Introductory overview: Error metrics for hydrologic modelling – a review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption. *Environ. Model. Softw.* 2019;119:32–48. doi: 10.1016/j.envsoft.2019.05.001

Kosyan R. D. (ed.). The Diversity of Russian estuaries and lagoons exposed to human influence. Switzerland: Springer; 2017. 270 p. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9

Lesin V. V., Lisovets Yu. P. Fundamentals of optimization methods. Moscow: MAI Publ.; 1998. 344 p. (In Russ.)

Marsili-Libelli S. Parameter estimation of ecological models. *Ecol. Model.* 1992;62:233–258. doi: 10.1016/0304-3800(92)90001-U

Marsili-Libelli S., Guerrizio S., Checchi N. Confidence regions of estimated parameters for ecological systems. *Ecol. Model.* 2003;165:127–146. doi: 10.1016/S0304-3800(03)00068-1

Model sensitivity and uncertainty analysis. *Water resources systems planning and management.* UNESCO; 2005. P. 255–290.

Motovilov Yu. G., Gel'fan A. N. Models of runoff formation in problems of hydrology of river basins. Moscow: IWP RAN Publ.; 2018. 300 p. (In Russ.)

Nelder J. A., Mead R. A simplex method for function minimization. *Comput. J.* 1965;7:308–313. doi: 10.1093/comjnl/7.4.308

Podgorny K. A., Dmitrieva O. A. Mathematical modeling of the transformations of nutrient compounds in the Vistula Lagoon ecosystem, Baltic Sea. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2022;6:142–160. doi: 10.17076/lim1605 (In Russ.)

Podgorny K. A., Leonov A. V. The use of a spatially heterogeneous simulation model for studying biotransformation processes of nitrogen and phosphorus compounds and the dynamics of oxygen dissolved in water in the ecosystem of Neva Bay, the Gulf of Finland: 1. Model description. *Water Resources.* 2013a;40(2): 170–180. doi: 10.1134/S0097807813020061

Podgorny K. A., Leonov A. V. The use of a spatially heterogeneous simulation model for studying biotransformation processes of nitrogen and phosphorus compounds and the dynamics of oxygen dissolved in water in the ecosystem of Neva Bay, the Gulf of Finland: 2. Input data for calculations, modeling results, and their analysis. *Water Resources.* 2013b;40(3):254–270. doi: 10.1134/S009780781303007X

Podgorny K. A., Leonov A. V. Review of the current methods used to assess the values of coefficients, sensitivity, and adequacy of simulation models of aquatic ecosystems. *Water Resources.* 2015;42(4):477–499. doi: 10.7868/S0321059615040124

Podgorny K. A. Mathematical model for studying the ecosystem of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea. Part 1. Theoretical foundations and structure of the model, methodology for preparing initial data for performing calculations. Kaliningrad: AtlantNIRO Publ.; 2018. 271 p. (In Russ.)

Podgorny K. A. Mathematical modeling of freshwater ecosystems in non-stratified water bodies: algorithms and numerical methods. Rybinsk: Rybinskii dom pechati; 2003. 328 p. (In Russ.)

Rykov A. S. Search engine optimization. Methods of deformable configurations. Moscow: Fizmatlit; 1993. 216 p. (In Russ.)

Steenbeek J., Buszowski J., Chagaris D., Christensen V., Coll M., Fulton E. A., Katsanevakis S., Lewis K. A., Mazaris A. D., Macias D., de Mutsert K., Oldford G., Pennino M. G., Piroddi C., Romagnoni G., Serpetti N., Shin Y.-J., Spence M. A., Stelzenmüller V. Making spatial-temporal marine ecosystem modelling better – a perspective. *Environ. Model. Softw.* 2021;145:105209. doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105209.

Subbey S. Parameter estimation in stock assessment modelling: caveats with gradient-based algorithms. *ICES Journal of Marine Science.* 2018;75: 1553–1559. doi: 10.1093/icesjms/fsy044.

Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam: North-Holland; 1971. 474 p.

Törn A., Zilinskas A. Global optimization. Lectures notes in computer science. Berlin: Springer-Verlag; 1989. Vol. 350. 260 p.

Witek Z., Zalewski M., Wielgat-Rychert M. Nutrient stocks and fluxes in the Vistula lagoon at the end of the twentieth century. Slupsk-Gdynia; 2010. 186 p.

*Поступила в редакцию / received: 13.12.2023; принята к публикации / accepted: 19.03.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Подгорный Константин Алексеевич**

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории лиманов Балтийского моря, лаборатории экологии и оценки запасов промысловых популяций

*e-mail: kapborok@mail.ru*

### **Дмитриева Ольга Александровна**

канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии «АтлантНИРО», научный сотрудник лаборатории морской экологии ИО РАН (Атлантическое отделение)

*e-mail: phytob@yandex.ru*

### **Семенова Анна Сергеевна**

канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии «АтлантНИРО», старший научный сотрудник лаборатории экологии водных беспозвоночных ИБВВ РАН

*e-mail: a.s.semenowa@mail.ru*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Podgornyi, Konstantin**

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

### **Dmitrieva, Olga**

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, "AtlantNIRO";  
Researcher, IO RAS (Atlantic Branch)

### **Semenova, Anna**

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

УДК 63 : 502.17

## МЕТОДИКА СБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИФфуЗНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ (НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА)

А. Ю. Брюханов<sup>1</sup>, С. А. Кондратьев<sup>2</sup>, Н. Н. Филатов<sup>3</sup>, Э. В. Васильев<sup>1</sup>,  
Н. С. Обломкова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Фильтровское ш., 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Россия, 196634), \*oblomkovans@gmail.com

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

<sup>3</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Создана и опробована методика сбора информации для расчета диффузного выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий в водные объекты по модели ИАЭП в условиях отсутствия детальных сведений по отдельным сельхозпредприятиям применительно к условиям водосбора Онежского озера. Методика позволяет осуществлять получение комплексной информации о сельскохозяйственных объектах с учетом их воздействия на окружающую среду. В основе методики лежит использование пространственного анализа и ГИС-технологий для более точного расчета нагрузки с учетом характеристики сельскохозяйственной деятельности и местоположения относительно водных объектов. Это позволяет выполнить комплексный анализ в привязке к пространственным параметрам среды. Методика обеспечивает расчет выхода и состава навоза с учетом систем его хранения, переработки и внесения, а также оценку параметров миграции биогенных веществ в зависимости от расположения сельскохозяйственных угодий относительно водных объектов. По итогам анализа сельскохозяйственных объектов в ГИС с учетом общедоступных сведений определяется поголовье животных и птицы, выход навоза, а также количество навозохранилищ на рассматриваемом предприятии, что в итоге позволяет оценить средние нормы внесения азота и фосфора с органическими удобрениями. Предложенная методика реализована на водосборном бассейне Онежского озера с целью подготовки данных для расчета диффузной нагрузки азота и фосфора в 2010 и 2021 гг. Использование модели формирования сельскохозяйственной биогенной нагрузки ИАЭП позволило оценить и сравнить поступление азота и фосфора на водосбор Онежского озера в указанные периоды.

Ключевые слова: биогенная нагрузка; внесение удобрений; животноводческие предприятия; геоинформационная система; Онежское озеро

Для цитирования: Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Филатов Н. Н., Васильев Э. В., Обломкова Н. С. Методика сбора исходных данных для оценки диффузного сельскохозяйственного загрязнения водных объектов (на примере водосборного

**A. Yu. Briukhanov<sup>1</sup>, S. A. Kondratyev<sup>2</sup>, N. N. Filatov<sup>3</sup>, E. V. Vasilev<sup>1</sup>, N. S. Oblomkova<sup>1\*</sup>.  
METHODOLOGY FOR COLLECTING INITIAL DATA TO ASSESS DIFFUSE AGRICULTURAL  
POLLUTION OF WATER BODIES (THE CASE OF THE LAKE ONEGO CATCHMENT)**

<sup>1</sup> Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM” (3 Filtrovskoe St., 196634 Tyarlevo village, St. Petersburg, Russia), \*oblomkovans@gmail.com

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

<sup>3</sup> Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

The article is aimed at developing and testing a methodology for collecting information to calculate the diffuse input of nitrogen and phosphorus from agricultural land to water bodies using the IEEP model due to the lack of detailed information on individual agricultural enterprises in relation to the conditions of the Lake Onego catchment. The methodology enables obtaining comprehensive information about agricultural objects, taking into account their impact on the environment. The methodology is based on the use of spatial analysis and GIS technologies to calculate the load more accurately, considering the characteristics of agricultural activities and distance to water bodies. Thus, one can perform a comprehensive analysis in relation to the spatial parameters of the environment. The methodology provides the calculation of the volume and composition of manure, considering systems for its storage, processing and application, as well as assessment of the nutrients migration parameters depending on the location of agricultural land. Based on the results of the agricultural objects analysis in the GIS, in view of available information, the number of animals and poultry, the production of manure, as well as the number of manure storage facilities at the enterprise, the average application rates of nitrogen and phosphorus with organic fertilizers are quantified. The proposed methodology was implemented in the Lake Onego catchment to prepare data for calculating the nitrogen and phosphorus diffuse load in 2010 and 2021. The IEEP methodology helped to assess and compare nutrient input from agriculture to the Lake Onego water objects in 2010 and 2021.

**Keywords:** nutrient input; fertilizer application; livestock enterprises; geographic information system; Lake Onego

**For citation:** Briukhanov A. Yu., Kondratyev S. A., Filatov N. N., Vasilev E. V., Oblomkova N. S. Methodology for collecting initial data to assess diffuse agricultural pollution of water bodies (the case of the Lake Onego catchment). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 95–107. doi: 10.17076/lim1863

**Funding.** The study was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 22-17-00193.

## Введение

Антропогенное эвтрофирование – одна из важнейших экологических проблем пресноводных водоемов России [Антропогенное..., 1982]. Причиной служит интенсивная биогенная нагрузка антропогенного происхождения со стороны водосбора. При этом современная система мониторинга не позволяет выполнить адекватную оценку поступления азота и фосфора в реки, озера и водохранилища со стоком притоков ввиду малочисленности пунктов измерений

расходов воды и гидрохимических характеристик. Сельскохозяйственная деятельность на водосборе – один из основных источников поступления биогенных элементов в водные объекты.

При оценке воздействия на окружающую среду источники поступления примесей в реки, озера и водохранилища делятся на точечные и рассеянные (диффузные антропогенные + природные). Для оценки точечных источников в настоящее время разработано множество узлов контроля, датчиков, измерительных систем, что позволяет достаточно точно определять

количественный и качественный состав выделяемых в окружающую среду веществ. Оценка диффузного воздействия на окружающую среду представляет большую сложность, так как к диффузному воздействию относится совокупность рассеянных источников, оказывающих влияние на окружающую среду больших по площади и объему территорий, водных и воздушных бассейнов. В современном сельском хозяйстве интенсификация и наращивание объемов производства связаны с концентрацией поголовья животных и птицы на фермах, увеличением количества сильнодействующих средств подкормки и защиты растений на 1 га пашни, увеличением площадей пашни в регионах с благоприятными условиями для ведения растениеводства [Briukhanov et al., 2019].

К основным объектам сельскохозяйственного производства, оказывающим диффузное воздействие на окружающую среду, относятся: животноводческие и птицеводческие фермы, технологические процессы, выполняемые при обработке почв и выращивании растительных культур [Briukhanov et al., 2021]. Сельскохозяйственное предприятие можно рассмотреть в целом как агроэкосистему, взаимодействующую с компонентами окружающей среды и оказывающую на нее воздействие (преимущественно диффузное). Одним из ключевых условий для управления диффузным загрязнением является наличие системы с надежной и актуализированной информацией о его степени и тенденциях к изменению.

Для расчета диффузной нагрузки разработаны ряд российских и зарубежных моделей [Кондратьев, Шмакова, 2019; Applied..., 2019]. Наиболее широкую апробацию за последние 5 лет в нашей стране получил метод (модель) расчета диффузной нагрузки азота и фосфора на водосбор при ведении сельскохозяйственной деятельности и потенциала ее снижения при использовании наилучших доступных технологий НДТ в сельском хозяйстве [Брюханов и др., 2016]. Метод разработан совместными усилиями специалистов ИАЭП и ИНОЗ РАН (далее – метод ИАЭП). Рассматриваются два источника поступления азота и фосфора – почва и удобрения (минеральные и органические). Одним из ключевых условий корректного применения методики расчета является качество исходных данных. Наличие возможности сбора и анализа полного комплекта актуальных сведений во многом определяет точность и достоверность результатов. В настоящее время ввиду отсутствия общедоступных сведений о деятельности отдельных сельскохозяйственных предприятий существует необходимость

создания метода сбора исходных данных на основе открытой информации без существенной потери точности расчета.

Цель данной работы – создание и апробация методики сбора информации для расчета диффузного выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий в водные объекты по методу (модели) ИАЭП в условиях отсутствия детальных сведений по отдельным сельскохозяйственным предприятиям применительно к условиям водосбора Онежского озера.

## **Объект исследования**

Онежское озеро и его крупнейший приток Илекса–Водла является верхним звеном самой большой европейской озерно-речной системы Невы [Лозовик и др., 2016]. Озеро дренирует значительную территорию, разнообразную по геологическому строению, рельефу, орографии и гидрографии. Бассейн Онежского озера вытянут в широтном направлении и асимметричен. Озеро делит его на две неравные части – западную (64 %) и восточную (36 %), что определяет неравномерность времени добега воды для разных притоков (рис. 1).

В естественном состоянии озеро принимало сток с водосборного бассейна площадью 53 100 км<sup>2</sup>. После строительства в 1953 г. на р. Свири Верхне-Свирской ГЭС озеро стало водохранилищем с водосборной площадью, равной 57 300 км<sup>2</sup>. Около 70 % территории бассейна относится к Республике Карелия, остальная часть расположена в Ленинградской, Вологодской и Архангельской областях. Более половины бассейна занято водосборами трех главных притоков озера: рек Шуи (площадь водосбора 10,1 тыс. км<sup>2</sup>), Суны (7,7 тыс. км<sup>2</sup>), Водлы (13,7 тыс. км<sup>2</sup>). Вытекает из озера лишь одна река – Свирь, крупнейший приток Ладожского озера. Изучаемая территория относится к Европейской сельскохозяйственной провинции среднетаежной зоны холодного пояса, для которой характерны низкая биоклиматическая продуктивность и избыточное увлажнение. Сельскохозяйственное производство здесь сосредоточено в основном в южной части водосбора и представлено личными подсобными и фермерскими хозяйствами.

## **Материалы и методы**

Согласно методу ИАЭП эмиссия азота и фосфора рассчитывается от площади сельскохозяйственных угодий, на которых осуществляется хозяйственная деятельность и которые имеют привязку к водотокам.

Порядок расчета диффузной нагрузки азота и фосфора на водосбор при ведении сельскохозяйственной деятельности определяется следующим выражением (1):

$$L_{agr} = \sum_i A_i (M_{soil} K_1 + (\alpha_1 M_{min} + \alpha_2 M_{org}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5 / 1000, \quad (1)$$

где  $L_{agr}$  – нагрузка, сформированная на полях сельхозпредприятий и поступившая в ближайший водоток (т/год);  $M_{soil}$ ,  $M_{min}$  и  $M_{org}$  – содержание биогенного вещества в пахотном слое почвы, а также дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля  $i$ -го сельхозпредприятия (кг/га);  $A_i$  – площадь угодий  $i$ -го сельхозпредприятия (га);  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты попадания биогенных веществ в сток с учетом усвоения соответственно минеральных и органических удобрений сельхозкультурами;  $K_1$  – коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв;  $K_2$  – коэффициент удаленности контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети;  $K_3$  – коэффициент, характеризующий тип почв (по происхождению);  $K_4$  – коэффициент,

характеризующий механический состав почв;  $K_5$  – коэффициент, учитывающий тип сельхозпредприятия и структуру сельхозугодий;  $K_6$  – коэффициент соответствия технологии применения органических и минеральных удобрений наилучшим доступным технологиям (НДТ).

Сбор информации, необходимой для выполнения расчетов по методу ИАЭП, представляет собой отдельную трудоемкую задачу, требующую квалифицированной экспертной оценки каждого конкретного объекта, опыта работы с базами данных и архивными материалами, высоким уровнем владения ГИС-технологиями и дешифрирования космических снимков. На рис. 2. приведено схематическое представление методики сбора и анализа данных, необходимых для оценки параметров метода (модели) ИАЭП.

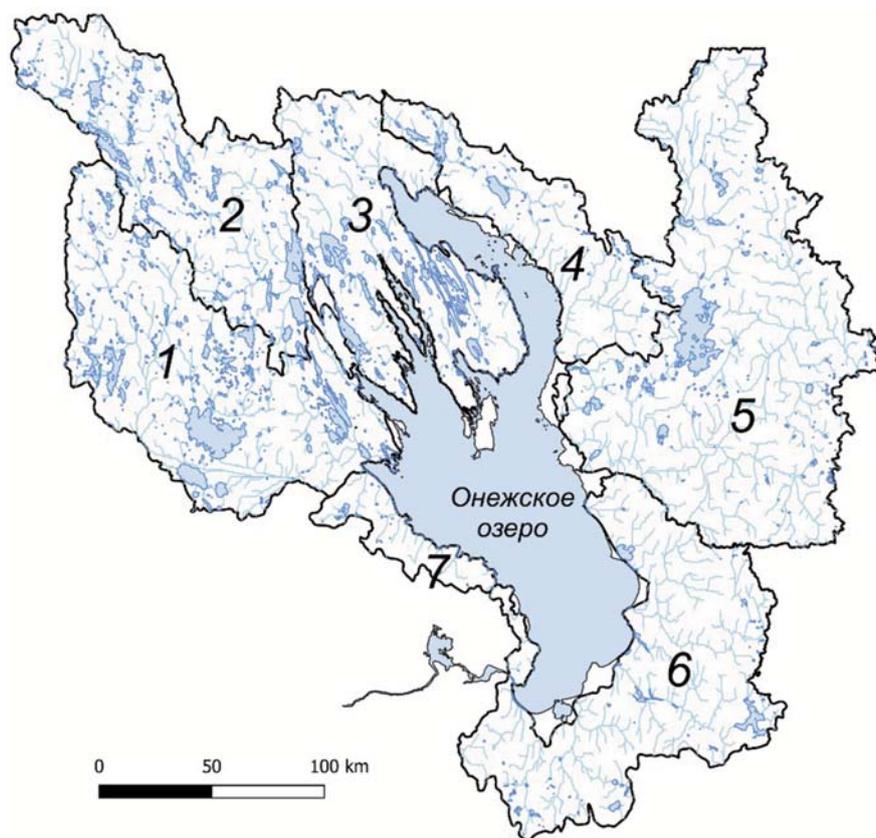


Рис. 1. Гидрографическая структура бассейна Онежского озера: водосборы рек Шуи (1) и Суны (2), Заонежье (3), водосборы восточных притоков (4), реки Водлы (5), южных (6) и западных притоков (7)

Fig. 1. Hydrographic structure of the Lake Onego basin: watersheds of the Shuya (1) and Suna (2), Zaonezhye (3) Rivers, watersheds of eastern tributaries (4), Vodla River (5), southern (6) and western tributaries (7)

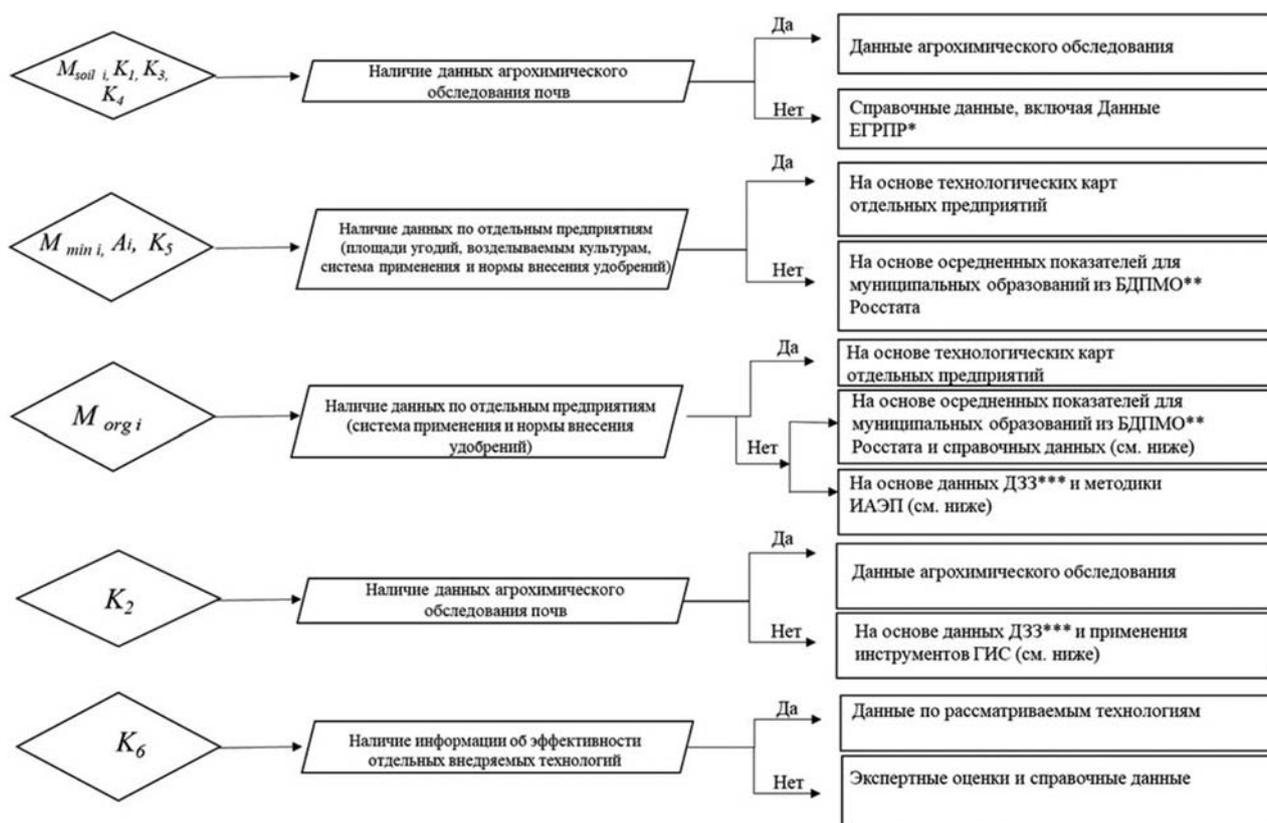


Рис. 2. Процесс сбора исходных данных в зависимости от доступности информации о деятельности сельскохозяйственных предприятий:

\*ЕГРПР – Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, \*\*БДПМО – база данных показателей муниципальных образований, \*\*\*ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

Fig. 2. Collecting initial data depending on the availability of information about agricultural activities:

\*ЕГРПР – Unified State Register of Soil Resources of Russia, \*\*БДПМО – database of municipalities indicators, \*\*\*ДЗЗ – Earth remote sensing

Содержание или запас азота и фосфора в пахотном слое почв (20–25 см)  $M_{soil}$  определяется по справочным материалам и литературным данным [Единый...; Почвоведение, 1972; Гинзбург, 1981]. За основу расчета в данном случае принимается подзолистая почва. Коэффициент  $K_1$ , характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почвы, определяет долю биогенных веществ, содержащихся в почве, которые могут перейти в сток с единичного участка сельхозугодий в месте непосредственного соприкосновения стока и почвы. Зависит от условий увлажнения и содержания азота и фосфора в почве сельскохозяйственных угодий – чем богаче почва азотом и фосфором, тем, соответственно, их вымывается больше. Значение коэффициента могут быть получены по итогам выполнения обследования конкретных территорий, а в случае отсутствия сведений значения могут быть рассчитаны на основе справочных данных для характерных типов почв и условий увлажнения.

$K_3$  и  $K_4$  используются в качестве дополнительных коэффициентов, позволяющих учесть распространенность различных типов почв в границах рассматриваемого водосборного бассейна и связанных с этим параметров, определяющих содержание питательных веществ в почве и интенсивность миграции за пределы пахотного слоя. В условиях отсутствия детальных сведений о доле потерь биогенных веществ из корнеобитаемого горизонта в результате вымывания и смыва на рассматриваемой территории используются средние значения, приведенные в агрохимической литературе [Методические..., 2000].

Коэффициенты попадания биогенных веществ в сток определяют долю потерь минеральных ( $\alpha_1$ ) и органических ( $\alpha_2$ ) удобрений, не усвоенных сельхозкультурами. Азот поступает в гидрографическую сеть водосбора только из той части минеральных удобрений, которая не связана с урожаем, почвенной микрофлорой и почвенным поглощающим комплексом.

В среднем до 70 % азота минеральных удобрений не могут участвовать в вымывании в водные объекты. С учетом этого для минеральных удобрений коэффициент попадания азота в сток ( $\alpha_1$ ) может быть ориентировочно принят равным 0,3. В органических удобрениях основное количество азота находится в органической форме, и поэтому он менее подвижен. Часть подвижного азота усваивается растениями и микрофлорой почвы, другая закрепляется в почве, как и азот минеральных удобрений. Поэтому коэффициент, влияющий на попадание в сток азота из органических удобрений ( $\alpha_2$ ), составляет 0,1 [Barrows, Kilmer, 1963; Amberger, Schweiger, 1973; Справочник..., 1976].

Фосфор минеральных удобрений малоподвижен в почве, большая его часть закрепляется в ней и поглощается растениями и микрофлорой почвы. Коэффициент  $\alpha_1$  для минеральных фосфорных удобрений может быть принят равным 0,03. Значение  $\alpha_2$  для органических удобрений может ориентировочно оцениваться в 0,02, так как часть фосфора органических удобрений находится в органических соединениях и становится подвижной только после минерализации [Barrows, Kilmer, 1963; Amberger, Schweiger, 1973; Справочник..., 1976].

При определении массы азота и фосфора, поступающих с минеральными удобрениями ( $M_{min}$ ), площади сельскохозяйственных угодий ( $A_i$ ) и структуры землепользования ( $K_g$ ) используются официальные данные статистики по агропромышленному комплексу, данные конкретных сельхозпредприятий, нормативные и справочные материалы. В условиях отсутствия детальных сведений по отдельным предприятиям применяется метод осредненной оценки по агрегированным сведениям, приведенным в базе данных показателей муниципальных образований. В подобном случае в качестве исходных данных выступают количественные показатели о площади посевов различных культур, суммарном внесении минеральных удобрений на уровне муниципального района за рассматриваемый год.

Определение массы азота и фосфора, поступающих с органическими удобрениями ( $M_{org}$ ), целесообразно проводить на основе данных о фактическом внесении по отдельным предприятиям. С учетом того, что подобная информация в большинстве случаев недоступна, ИАЭП разработана дополнительная методика анализа животноводческих сельскохозяйственных объектов, позволяющая определять показатели деятельности животноводческих предприятий, необходимые для приближенной оценки поступления азота и фосфора на рассматриваемой территории с органическими удобрениями.

Алгоритм методики включает четыре основных пункта. На первом этапе выполняется сбор необходимых исходных данных о животноводческом предприятии, регионе размещения предприятия, применяемых технологиях и технических средствах. Осуществляется формализованное представление данных. Далее производится расчет количественных характеристик навоза/помета и определение количества/объема систем хранения навоза/помета с применением существующих методик расчета [Shalavina et al., 2022]. На заключительном этапе проводится анализ деятельности сельхозпредприятия. В результате определяется поголовье животноводческих и птицеводческих предприятий, выход навоза/помета, количество и объем навозохранилищ.

Коэффициент  $K_2$ , учитывающий удаленность сельскохозяйственных угодий от водных объектов, играет ключевую роль при оценке условий миграции биогенных веществ в водные объекты. Для расчета значения коэффициента определяется средневзвешенное значение удаленности поля от водного объекта на основе пространственного анализа в среде ГИС с использованием инструментов построения буферных зон вдоль основных водотоков.

Коэффициенты, учитывающие удаленность сельскохозяйственных угодий от водных объектов, принимаются на основании обобщения данных, полученных из литературы и справочных материалов, и представлены в табл. 1 [Методические..., 1988; Johnes, Heathwaite, 1997].

Таблица 1. Коэффициенты удаленности сельскохозяйственных угодий от водных объектов

Table 1. Coefficients, related to the distance between agricultural land and water bodies

Удаленность контура, м Distance to water body, meters	для азота for nitrogen	для фосфора for phosphorous
от 50 до 500 from 50 to 500	0,6	0,6
от 500 до 2000 from 500 to 2000	0,2	0,2
от 2000 до 5000 from 2000 to 5000	0,1	0,2

Коэффициент соответствия технологии применения органических и минеральных удобрений наилучшим доступным технологиям ( $K_6$ ) применяется для оценки потенциального снижения потерь азота и фосфора в водные объекты при внедрении принципов НДТ на рассматриваемых сельскохозяйственных предприятиях. Внедрение НДТ применения удобрений предусматривает оценку качества почвы, потребности выращиваемых культур и расчет

необходимых доз удобрений. Поэтому коэффициент  $K_6$  отражает комплексное воздействие на снижение выноса азота и фосфора наилучшего сочетания технологических и управленческих решений, направленных на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. При определении факторов воздействия НДТ на вынос азота и фосфора с водосбора используются критерии НДТ по ГОСТ Р 54097-2010 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации».

Определение значений коэффициента соответствия технологии применения органических и минеральных удобрений наилучшим доступным технологиям является сложной методической задачей. Значения коэффициента  $K_6$ , полученные специалистами ИАЭП по результатам анализа отечественного и зарубежного опыта внедрения НДТ, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициент  $K_6$ , отражающий уровень технологий применения удобрений

Table 2.  $K_6$  coefficient, related to the technologies of fertilizer application

Вид удобрения Fertilizer type	Азот Nitrogen		Фосфор Phosphorous	
	без НДТ without BAT	с НДТ with BAT	без НДТ without BAT	с НДТ with BAT
Твердые органические Solid organic	1	0,25	1	0,1
Жидкие органические Liquid organic	1	0,25	1	0,1

## Результаты и обсуждение

Предложенная методика сбора данных использована для оценки значений параметров уравнения (1) метода ИАЭП и последующего выполнения расчетов диффузного выноса азота и фосфора сельскохозяйственного происхождения с водосборного бассейна Онежского озера. Расчеты проводились для условий 2010 и 2021 гг. с целью выявления общей тенденции изменения биогенной сельскохозяйственной нагрузки за эти годы.

Для определения ежегодного количества азота и фосфора, вносимых с органическими удобрениями, проведен анализ поголовья основных видов сельскохозяйственных животных. Анализ и сбор данных производился на основе изучения официальных статистических данных. В результате сбора, анализа и обобщения данных была сформирована таблица с указанием поголовья основных видов животных. При определении поголовья учитывались животные, которые содержатся в сельскохозяйственных организациях, хозяйствах населения, крестьянских (фермерских) хозяйствах и индивидуальными предпринимателями. Анализ поголовья животных и птицы за 2010 и 2021 гг. показывает, что на рассматриваемой территории имеется множество личных подсобных и фермерских хозяйств, на их долю приходится большая часть поголовья животных и птицы, при этом практически отсутствуют крупные животноводческие предприятия. На рис. 3 приведены сводные данные.

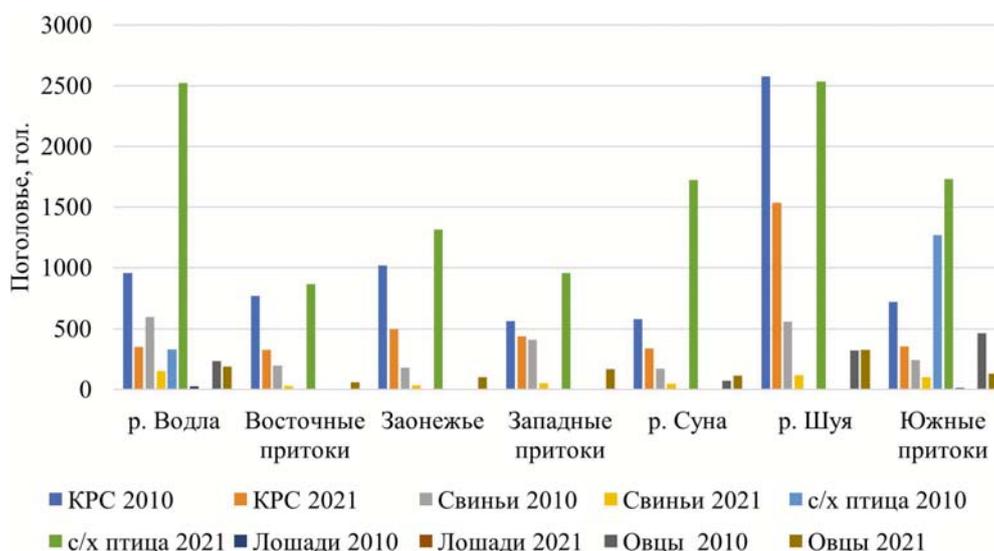


Рис. 3. Поголовье сельскохозяйственных животных на исследуемой территории (КРС – крупный рогатый скот)

Fig. 3. Livestock on the studied area (KPC – cattle)

Исходя из информации, представленной на рис. 3, можно сделать заключение, что наибольшая концентрация сельскохозяйственной птицы характерна для подбассейнов рек Водлы и Шуи, по поголовью крупного рогатого скота лидирует территория в пределах бассейна р. Шуя. По всем видам животных на исследуемых территориях с 2010 по 2021 год произошло сокращение поголовья, кроме сельскохозяйственной (с/х) птицы. В ходе анализа установлено, что основное поголовье сосредоточено в личных подсобных и фермерских хозяйствах. На рассматриваемой территории действуют три основных сельскохозяйственных предприятия по разведению крупного рогатого скота – ОАО «Агрокомплекс им. В. М. Зайцева», ЗАО «Пряжинское» и ЗАО «Эссойла» (рис. 4).

На рис. 5 проиллюстрирован процесс сбора и анализа данных для расчета коэффициента  $K_2$ , а именно:

- шаг 1 – сбор данных о структуре землепользования на рассматриваемой территории (как правило, используются данные дистанционного зондирования земли);
- шаг 2 – формирование слоев данных с нанесением сельскохозяйственных угодий;
- шаг 3 – нанесение водотоков;
- шаг 4 – построение буферных зон вдоль водотоков на заданной дистанции (500 м, 2000 м, 5000 м);
- шаг 5 – расчет площади угодий, попадающих в пределы каждой из указанных зон, с использованием инструментов пространственного анализа.



а)



б)



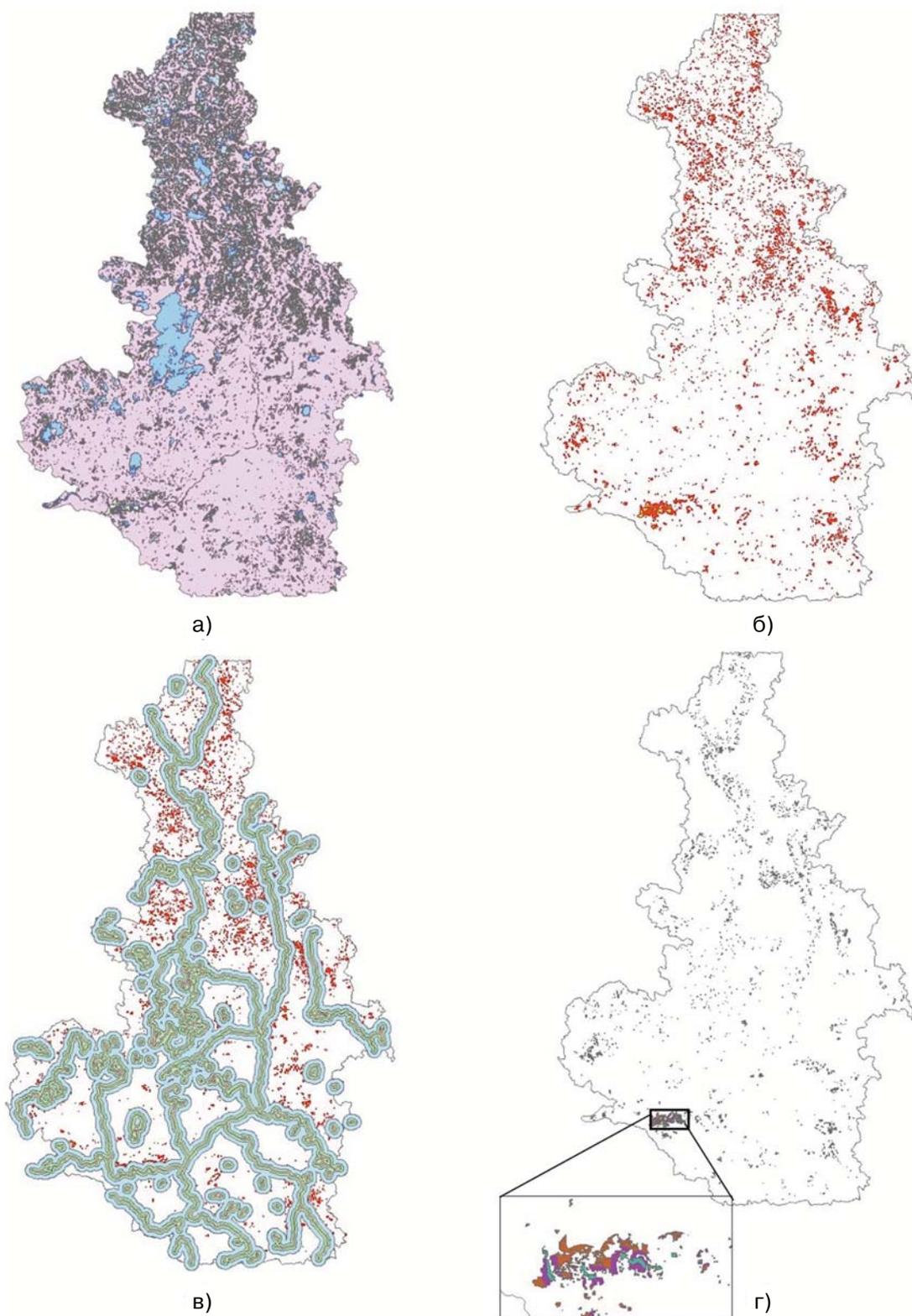
в)

Рис. 4. Космические снимки сельскохозяйственных предприятий, расположенных на рассматриваемой территории:

а) ОАО «Агрокомплекс им. В. М. Зайцева»; б) ЗАО «Пряжинское»; в) ЗАО «Эссойла»

Fig. 4. Space images of the agricultural enterprises located on the territory:

а) OJSC "Agrocomplex named after V. M. Zaitsev"; б) CJSC "Pryazhinskoye"; в) CJSC "Essoila"



*Рис. 5.* Иллюстрация алгоритма выполнения пространственного анализа на примере водосбора реки Водла:

а) анализ структуры землепользования; б) нанесение контуров сельскохозяйственных угодий; в) нанесение контуров водотоков и построение буферных зон; г) пространственный анализ расположения полей в пределах буферных зон

*Fig. 5.* Illustration of the spatial analysis based on the example of the Vodla River watershed:

a) analysis of the land use structure; б) contouring the agricultural land borders; в) contouring the watercourses and creating buffer zones borders; г) spatial analysis of the fields location within the buffer zones

Полученные доли расположения полей в границах зон по каждому муниципальному району используются для расчета средневзвешенного значения коэффициента  $K_2$  для рассматриваемого водосбора.

С учетом отсутствия детальных сведений по каждому сельскохозяйственному предприятию значения остальных параметров расчетного метода оценивались на основе официальной статистической информации, размещенных в базе данных показателей муниципальных образований и справочных сведений на уровне муниципального района [Единый..., Почвоведение..., 1972; Гинзбург, 1981; Методические..., 2000]. Принятые значения коэффициентов для расчета приведены в табл. 3.

Далее выполнен расчет годового выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных территорий и их поступления в первичную гидрографическую сеть водосбора Онежского озера, сформированного в результате сельскохозяйственной деятельности в 2010 и 2021 гг. с привязкой к основным речным подбассейнам. Результаты показаны на рис. 6 и 7.

Согласно проведенным расчетам суммарный вынос биогенных элементов с изучаемого водосбора и их поступление в первичную гидрографическую сеть в результате сельскохозяйственной деятельности составили: в 2010 г. –

125 тN/год и 3,9 тP/год, в 2021 г. – 89 тN/год и 2,9 тP/год. Основная нагрузка формируется на территории подбассейна реки Шуя и в подбассейне южных притоков (около 60 %), где расположены основные посевные площади. Суммарное поступление биогенных веществ в 2010 г. примерно на 29 % по азоту и 26 % по фосфору выше рассчитанного поступления в 2021 г. Подобная динамика характерна для всех бассейнов, за исключением территории бассейна западных притоков, где к 2021 г. поступление увеличилось на 27 % по азоту и 6 % по фосфору. В остальных подбассейнах сокращение поступления азота составило от 8 до 54 % по азоту и от 10 до 51 % по фосфору.

Таблица 3. Диапазон значений коэффициентов, использованных в расчете

Table 3. Range of coefficient values used in the calculation

Коэффициент Coefficient	Диапазон значений Values	
	Азот Nitrogen	Фосфор Phosphorous
$K_1$	0,0051	0,000476
$K_2$	0,10–0,60	0,20–0,60
$K_3$	1,00–1,81	1,00–3,94
$K_4$	1,00–1,80	1,00–2,00
$K_5$	0,40–1,00	0,20–0,85
$K_6$	0,25	0,10

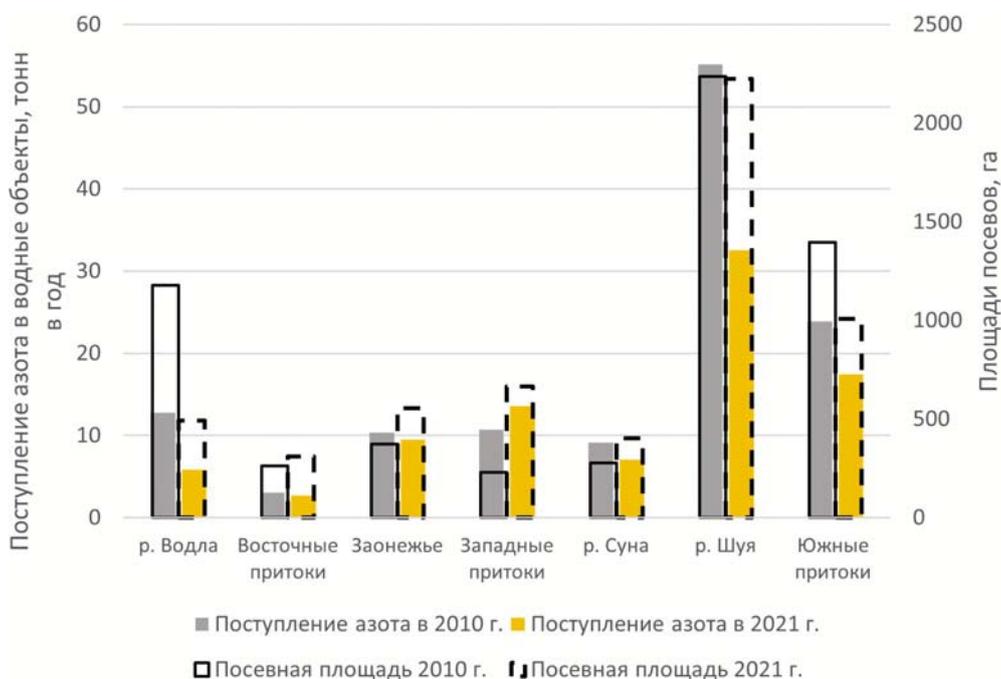


Рис. 6. Вынос азота в первичную гидрографическую сеть подбассейнов в результате сельскохозяйственной деятельности в 2010 и 2021 гг.

Fig. 6. Nitrogen input to the primary hydrographic network of the sub-basins from agricultural activities in 2010 and 2021

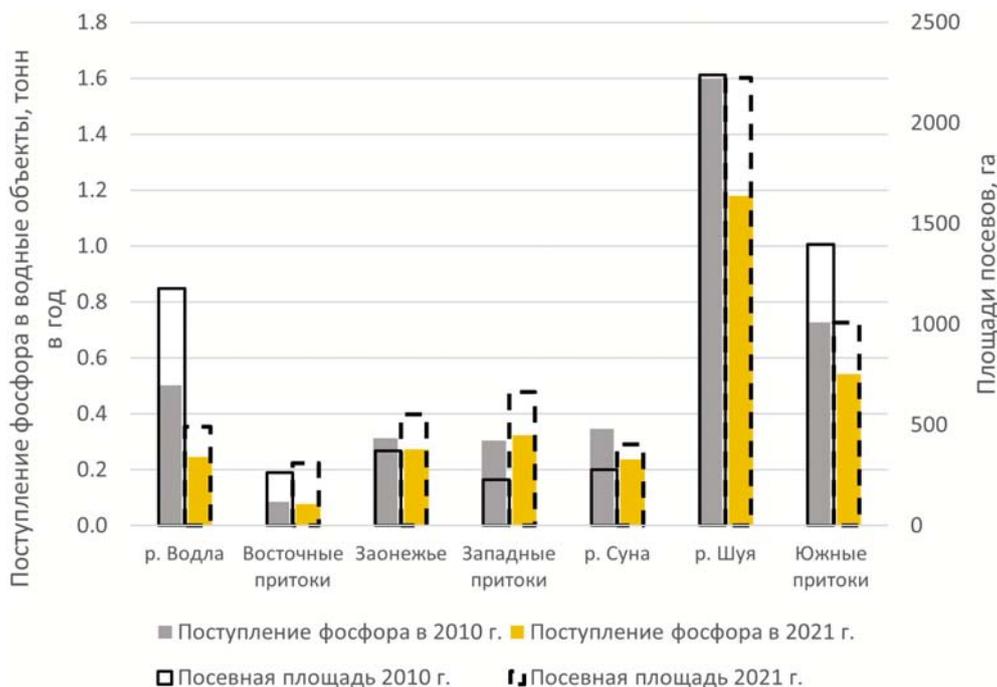


Рис. 7. Вынос фосфора в первичную гидрографическую сеть подбассейнов в результате сельскохозяйственной деятельности в 2010 и 2021 гг.

Fig. 7. Phosphorous input to the primary hydrographic network of the sub-basins from agricultural activities in 2010 and 2021

Согласно расчетам, максимальное снижение (более 50 %) наблюдается в бассейне реки Водлы, что может быть связано с существенным сокращением посевных площадей к 2021 г. Диапазон изменения удельного поступления азота между выделенными подбассейнами в 2010 и 2021 гг. составляет от 8,72 до 46,71 кг/га в год, фосфора – от 0,25 до 1,33 кг/га в год, что сопоставимо с данными, полученными в аналогичных исследованиях в странах региона Балтийского моря [Jakobsson, 2012; HELCOM..., 2018; Jansson et al., 2019; Sandström et al., 2019].

## Выводы

Разработанная методика сбора информации о деятельности сельскохозяйственных объектов позволяет определить поголовье животных, птицы, выход навоза и количество навозохранилищ на анализируемом предприятии, дозы внесения органических удобрений и обеспечивает возможность выполнять расчеты выноса биогенных элементов и формирования биогенной нагрузки на первичные звенья гидрографической сети с использованием метода расчета нагрузки ИАЭП. Применение указанной методики сбора данных на водосборе Онежского озера и его

подбассейнах позволило рассчитать диффузный вынос азота и фосфора от сельскохозяйственной деятельности с территории изучаемого объекта. В 2021 г. средние потери биогенных веществ в водные объекты составили 20 и 0,65 кг/га в год для азота и фосфора соответственно. Полученные результаты сопоставимы с данными аналогичных исследований в странах региона Балтийского моря, что позволяет предположить адекватность результатов расчетов, выполненных по методу ИАЭП с применением созданной методики определения параметров. Дальнейшее совершенствование методики заключается в накоплении и использовании дешифровочных признаков производственных зданий и навозохранилищ и уточнении параметров миграции биогенных веществ в водные объекты.

## Литература

- Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Ред. Н. А. Петровой. Л.: Наука, 1982. 304 с.
- Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Обломкова Н. С., Огуздин 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.

Гинзбург К. Е. Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 235 с.

Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [Электронная база данных]. URL: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1DB.html> (дата обращения: 14.04.2023).

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.

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

Методические указания по расчету поступления биогенных элементов в водоемы от рассредоточенных нагрузок и установлению водоохранных мероприятий. Утверждены НТС Госагропрома РСФСР 17.02.88. Всесоюзное проектно-изыскательское и научно-исследовательское объединение «Союзвод-проект», 1988.

Методические указания по определению баланса питательных веществ азота, фосфора, калия, гумуса, кальция. М.: Изд-во ЦИНАО, 2000. 42 с.

Почвоведение / Ред. А. С. Фатьянова, С. Н. Тайчинова. М.: Колос, 1972. 480 с.

Справочник агрохимика / Ред. Д. А. Кореньков. М.: Россельхозиздат, 1976. 350 с.

Amberger A., Schweiger P. Wanderung der Pflanzennährstoffe in Boden und deren Bedeutung in einer umweltbewussten Landwirtschaft // Die Bodenkultur. 1973. No. 24. P. 221–237.

Applied methodology for the PLC-6 assessment / Ed. L. M. Svendsen, DCE Aarhus University, PLC-6 project manager. Finland, HELCOM, 2019. 59 p.

Barrows H. L., Kilmer V. J. Plant nutrient losses from soil by water erosion // *Advances in Agronomy*. 1963. No. 15. P. 303–316.

Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V., Subbotin I. A., Lukin S. M. Environmental assessment of live-563 stock farms in the context of BAT system introduction in Russia // *J. Environ. Manag.* 2019. Vol. 246. P. 283–288. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.105

Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V. Assessment of nitrogen flows at farm and regional level when developing the manure management system for large-scale livestock enterprises in North-West Russia // *Sustainability*. 2021. Vol. 13(12). Art. 6614. doi: 10.3390/su13126614

HELCOM, 2018. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea // *Baltic Sea Environment Proceedings* No. 153 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP153.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).

Jakobsson C. (ed.). Sustainable agriculture. 1st ed. Uppsala: Baltic University Press; 2012. 505 p. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:di-va-173215> (дата обращения: 04.12.2023).

Jansson T., Andersen H. E., Hasler B., Höglind L., Gustafsson B. G. Can investments in manure tech-

nology reduce nutrient leakage to the Baltic Sea? // *Ambio*. 2019. Vol. 48(11). P. 1264–1277. doi: 10.1007/s13280-019-01251-5

Johnes P. J., Heathwaite A. L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments // *Hydrol. Proc.* 1997. Vol. 11, iss. 3. P. 269–286. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3<269::AID-HYP442>3.0.CO;2-K

Sandström S., Futter M., Kyllmar K., Bishop K., O'Connell D., Djodjic F. Particulate phosphorus and suspended solids losses from small agricultural catchments: Links to stream and catchment characteristics // *Sci. Total Environ.* 2019. Vol. 711. Art. 134616. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134616

Shalavina E. V., Uvarov R. A., Vasilev E. V. Calculation methods of total nitrogen and total phosphorus distribution in pig manure fractions // *Eng. Technol. Syst.* 2022. Vol. 32, no. 1. P. 54–70. doi: 10.15507/2658-4123.032.202201.054-070

## References

Amberger A., Schweiger P. Wanderung der Pflanzennährstoffe in Boden und deren Bedeutung in einer umweltbewussten Landwirtschaft. *Die Bodenkultur*. 1973;24:221–237.

Barrows H. L., Kilmer V. J. Plant nutrient losses from soil by water erosion. *Advances in Agronomy*. 1963;15:303–316.

Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V., Subbotin I. A., Lukin S. M. Environmental assessment of live-563 stock farms in the context of BAT system introduction in Russia. *J. Environ. Manag.* 2019;246:283–288. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.105

Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V. Assessment of nitrogen flows at farm and regional level when developing the manure management system for large-scale livestock enterprises in North-West Russia. *Sustainability*. 2021;13(12):6614. doi: 10.3390/su13126614

Briukhanov A. Yu., Kondratyev S. A., Oblomkova N. S., Oguzdin 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 plant and animal products*. 2016;89:175–183. (In Russ.)

Fat'yanova A. S., Taichinova S. N. (eds.). Soil science. Moscow: Kolos; 1972. 480 p. (In Russ.)

Ginzburg K. E. Phosphorous in main soils types in the USSR. Moscow: Nauka; 1981. 235 p. (In Russ.)

Guidelines for calculating biogenic elements supply to reservoirs from dispersed loads and establishing water protection measures. Approved by the Science and Engineering Board of the State Agricultural Industry of the RSFSR on 17.02.88. All-Union Design, Survey and Research Association 'Soyuzvodproekt', 1988. (In Russ.)

Guidelines for determining the balance of nutrients: nitrogen, phosphorus, potassium, humus, calcium. Moscow: TsINAO; 2000. 40 p. (In Russ.)

HELCOM, 2018. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings No. 153*. URL: <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP153.pdf> (accessed: 04.12.2023).

Jakobsson C. (ed.). Sustainable agriculture. 1<sup>st</sup> ed. Uppsala: Baltic University Press; 2012. 505 p. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:di-va-173215> (accessed: 04.12.2023).

Jansson T., Andersen H. E., Hasler B., Höglind L., Gustafsson B. G. Can investments in manure technology reduce nutrient leakage to the Baltic Sea? *Ambio*. 2019;48(11):1264–1277. doi: 10.1007/s13280-019-01251-5

Johnes P. J., Heathwaite A. L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments. *Hydrological Processes*. 1997;11(3):269–286. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3<269::AID-HYP442>3.0.CO;2-K

Kondratyev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the watershed – watercourse – reservoir system. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2019. 246 p. (In Russ.)

Koren'kov D. A. (ed.). Agrochemistry handbook. Moscow: Rosselkhozizdat; 1976. 350 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. 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. doi: 10.17076/lim303 (In Russ.)

Petrova N. A. (ed.). Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga. Leningrad: Nauka; 1982. 304 p. (In Russ.)

Sandström S., Futter M., Kyllmar K., Bishop K., O'Connell D., Djodjic F. Particulate phosphorus and suspended solids losses from small agricultural catchments: Links to stream and catchment characteristics. *Sci. Total Environ*. 2019;711:134616. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134616

Shalavina E. V., Uvarov R. A., Vasilev E. V. Calculation methods of total nitrogen and total phosphorus distribution in pig manure fractions. *Eng. Technol. Syst*. 2022;32(1):54–70. doi: 10.15507/2658-4123.032.202201.054-070

Svendson L. M. et al. (eds.). Applied methodology for the PLC-6 assessment. Finland, HELCOM; 2019. 59 p.

Unified State Register of Soil Resources of Russia. Electronic database. URL: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1DB.html> (accessed: 14.04.2023). (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 20.12.2023; принята к публикации / accepted: 31.01.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Брюханов Александр Юрьевич

член-корр. РАН, д-р техн. наук, директор

e-mail: [sznii@yandex.ru](mailto:sznii@yandex.ru)

### Кондратьев Сергей Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, руководитель лаборатории математических методов моделирования

e-mail: [3718470@gmail.com](mailto:3718470@gmail.com)

### Филатов Николай Николаевич

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, профессор, главный научный сотрудник

e-mail: [nfilatov@rambler.ru](mailto:nfilatov@rambler.ru)

### Васильев Эдуард Вадимович

канд. техн. наук, руководитель отдела

e-mail: [sznii6@yandex.ru](mailto:sznii6@yandex.ru)

### Обломкова Наталья Сергеевна

научный сотрудник

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

## CONTRIBUTORS:

### Briukhanov, Aleksander

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Tech.), Director

### Kondratyev, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory

### Filatov, Nikolay

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Chief Researcher

### Vasilev, Eduard

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

### Oblomkova, Natalia

Researcher

УДК 556 : 550.47 + 929

## К ЮБИЛЕЮ УЧЕНОГО-БАЙКАЛОВЕДА Е. Н. ТАРАСОВОЙ (1938–2017)

О. Т. Русинек<sup>1\*</sup>, Е. А. Мамонтова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Байкальский музей СО РАН (ул. Академическая, 1, пос. Листвянка, Иркутская область, Россия, 664520), \*o.rusinek@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (ул. Фаворского, 1А, Иркутск, Россия, 664033)

Статья посвящена известному ученому-гидрохимику, биогеохимику и байкаловеду, кандидату химических наук Евгении Николаевне Тарасовой (1938–2017), ее многолетним исследованиям и их результатам. На протяжении 56 лет своей творческой жизни она изучала органическое вещество Байкала – состав, распределение, преобразование, сезонную изменчивость, баланс и биогеохимический круговорот органического углерода, кремния, минеральных и органических форм азота и фосфора как во взвешенной, так и растворенной фракции, взвешенного вещества и хлорофилла *a*. В 1990-х годах Е. Н. Тарасова организовала и возглавила работы по изучению биогеохимии стойких органических загрязняющих веществ в водных и наземных экосистемах оз. Байкал и Байкальского региона. Объекты исследования Е. Н. Тарасовой: вода, донные отложения и биота озер Байкал, Хубсугул, Телецкое, их притоков, рек Лена и Ангара, Ангарских водохранилищ и др. водоемов Прибайкалья и Монголии, а также атмосферный воздух, атмосферные осадки, почвы, наземная растительность, продукты питания и биосубстраты жителей Байкальского региона, отдельных районов азиатской территории России, Монголии и Беларуси. Результаты исследований Е. Н. Тарасовой представлены в 487 печатных и рукописных работах, включая 4 монографии.

Ключевые слова: Е. Н. Тарасова; лимнолог; гидрохимик; биогеохимик; органическое вещество; Байкал; Байкальский регион; научное наследие

Для цитирования: Русинек О. Т., Мамонтова Е. А. К юбилею ученого-байкаловеда Е. Н. Тарасовой (1938–2017) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 108–116. doi: 10.17076/lim1868

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта Байкальского музея СО РАН № 121032900077-4 и проекта НИР ИГХ СО РАН № 0284-2021-0003.

**O. T. Rusinek<sup>1\*</sup>, E. A. Mamontova<sup>2</sup>. TO THE ANNIVERSARY OF BAIKAL RESEARCHER  
E. N. TARASOVA (1938–2017)**

<sup>1</sup> *Baikal Museum, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (1 Akademicheskaya St., 664520 Listvyanka, Irkutsk Region, Russia), \*o.rusinek@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (1A Favoriskii St., 664033 Irkutsk, Russia)*

This article pays tribute to Evgeniya Nikolaevna Tarasova (1938–2017), a renowned hydrochemist, biogeochemist, and Baikal scientist. It sheds light on her research findings and contributions to the field. Over her 56-year professional life, E. N. Tarasova studied the organic matter of Lake Baikal: its composition, distribution, transformation, seasonal variability, balance, and biogeochemical circulation of organic carbon, silicon, mineral and organic forms of nitrogen and phosphorus in both suspended and dissolved fractions, suspended matter and chlorophyll *a*. In the 1990s, E. N. Tarasova emerged as the leader of a group of researchers investigating the biogeochemistry of persistent organic pollutants in the aquatic and terrestrial ecosystems of Lake Baikal and the Lake Baikal region. E. N. Tarasova's research encompasses a wider range of objects, including the waters, sediments, and biota of Lakes Baikal, Hovsgol, and Teletskoye. She also examined their tributaries such as the Lena and Angara Rivers, as well as the Angara reservoirs and other waterbodies of the Lake Baikal region and Mongolia. Additionally E. N. Tarasova investigated atmospheric air, atmospheric precipitation, soil, terrestrial vegetation, food and bio-substrates of residents in the Lake Baikal region, as well as some areas of the Asian territory of Russia, Mongolia, and Belarus. E. N. Tarasova's research findings are presented in 487 printed and handwritten works, including 4 monographs.

**Keywords:** E. N. Tarasova; limnologist; hydrochemist; biogeochemist; organic matter; Lake Baikal; Lake Baikal region; scientific heritage

**For citation:** Rusinek O. T., Mamontova E. A. To the anniversary of Baikal researcher E. N. Tarasova (1938–2017). *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 108–116. doi: 10.17076/lim1868

**Funding.** The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Baikal Museum SB RAS No. 121032900077-4 and the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS No. 0284-2021-0003.

Евгения Николаевна Тарасова (рис. 1) – кандидат химических наук, известный байкаловед, специалист в области гидрохимии и биохимии органического вещества. Родилась 15 октября 1938 года в г. Енакиеве Донецкой области УССР, среднюю школу окончила в 1956 году в г. Петровск-Забайкальский [Мамонтова и др., 2018]. После окончания химического факультета Иркутского государственного университета в 1961 г. Е. Н. Тарасова получила распределение в Лимнологический институт (ЛИН) СО АН СССР, созданный в том же году на базе Байкальской лимнологической станции Постановлением Президиума АН СССР № 49 от 20.01.1961 г. За 30 лет работы в ЛИНе она прошла путь от старшего лаборанта, младшего и старшего научного сотрудника до заведующей лабораторией гидрохимии. В 1991 г. в связи с реорганизацией ЛИНа Е. Н. Тарасова переходит в Байкальский экологический музей (БЭМ) Иркутского научного центра СО РАН на должность старшего научного сотрудника в сектор экологии животных, а в 1993-м

становится заведующей сектором экологии животных в Отделе экологических исследований Прибайкалья. С 1995 по 2017 г. Е. Н. Тарасова – старший научный сотрудник Института геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН.

В 1964 г. Евгения Николаевна участвовала в первой кругобайкальской экспедиции на только что построенном НИС «Г. Ю. Верещагин», который называли «плавающим институтом». «С 1964 года ежемесячно «Верещагин» с отрядами из каждой лаборатории круглосуточно проводил комплексные исследования. Только на таком корабле возможно было проведение отбора проб воды с анализом взвешенных веществ, химического состава вод по глубинам по акватории всего озера с одновременным отбором проб и в реках в течение 10–15 дней... Работа шла непрерывно: отбор, анализы, снова отбор и снова анализы, из экспедиции приезжали уже с результатами» [Тарасова, 2004].

Во время аспирантуры Евгения Николаевна работала в районе Селенгинского мелководья, на станциях по нескольким разрезам



Рис. 1. Е. Н. Тарасова – выпускница Иркутского государственного университета. 1961 г. (фото из семейного архива Е. Н. Тарасовой)

Fig. 1. E. N. Tarasova is a graduate of Irkutsk State University. 1961 (photo from the family archive of E. N. Tarasova)

(от одного берега до другого) в Южном Байкале, а также в ежемесячных экспедициях на глубоководных точках в 12 км от м. Половинный и 7 км от м. Березовый (рис. 2). По результатам этих исследований было выявлено изменение концентраций органического вещества (ОВ) по глубине. Установлено, что сезонная динамика взвешенных и растворенных веществ в трофогенном слое глубоководных и мелководных районов озера обусловлена развитием планктона и характеризуется двумя выраженными максимумами (весенним и осенним) и двумя минимумами (летним и зимним), при обратном ходе сезонных изменений минеральных форм азота и фосфора [Тарасова, 1975]. Дана характеристика распределения минеральных, органических взвесей и растворенного ОВ в южной котловине, выявлено влияние р. Селенги на состав вод Южного Байкала. Показана количественная и качественная неоднородность в горизонтальном распределении взвеси и ОВ. Выявлено уменьшение содержания взвешенного вещества, общего

количества  $C_{орг}$ ,  $P_{орг}$  и  $N_{орг}$ , а также величины окисляемости воды по мере удаления от дельты р. Селенги к центру озера [Тарасова, Вотинцев, 1971; Тарасова, 1972].

Первая научная статья Е. Н. Тарасовой «Динамика органических соединений азота и фосфора как показатель биотического круговорота веществ в Байкале» вышла в соавторстве с К. К. Вотинцевым в 1971 г. [Тарасова, Вотинцев, 1971]. В ней установлена прямая зависимость содержания органических форм азота и фосфора от величин первичной продукции фитопланктона.

В 1974 г. Евгения Николаевна защитила кандидатскую диссертацию на тему «Органическое вещество в водах Южного Байкала» [Тарасова, 1973]. А через год была опубликована ее первая монография [Тарасова, 1975], в которой представлены изменения ОВ во взвеси и в растворе по  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$  и  $P_{орг}$  по сезонам и глубинам.



Рис. 2. Во время экспедиции на корабле. 1970-е годы (фото из личного архива Е. Н. Тарасовой)

Fig. 2. E. N. Tarasova during an expedition on a ship. The 1970s (photo from the personal archive of E. N. Tarasova)

Организатор изучения органической химии в СССР профессор Б. А. Скопинцев высоко оценил эти исследования, «...поскольку изучение ОВ по столь широкой программе проводилось впервые» [Личное...].

До 1975 г. Евгения Николаевна участвовала в темах Госкомитета и являлась ответственным исполнителем по разделам «Скорость распада органического вещества в воде пруда-аэратора Байкальского целлюлозного завода и в разбавлении ее байкальской водой в соотношении 1:1» и «Закономерности пространственного распределения и сезонных изменений общего количества взвешенного материала и  $C_{орг}$  в нем в толще вод Селенгинского мелководья». В ходе этой работы изучены суточные изменения содержания взвешенных веществ и элементного состава ОВ во взвешенном и растворенном состоянии в водах Байкала [Тарасова, 1975]. Впервые ОВ было оценено в грунтовых растворах донных отложений Байкала по органическим формам углерода, азота и фосфора [Тарасова, Мещерякова, 1992].

Со второй половины 1970-х годов Евгения Николаевна исследовала трансформацию компонентного состава ОВ у доминирующих планктонных организмов (*Sinédra*, *Aulocaseira (Melosira)*, *Gymnodinium*) в экспериментальных условиях и изучала последствия этого процесса в озере [Тарасова, 1979]. Также оценивалась внутренняя и внешняя нагрузка биогенных элементов на водоем, были изучены основные элементы круговорота ОВ и биогенных элементов в водах оз. Байкал и определены лимитирующие компоненты в развитии планктона [Тарасова, Мещерякова, 1992].

В середине 1980-х годов начинается новый этап в творческой жизни Евгении Николаевны, связанный с изучением влияния хозяйственной деятельности на оз. Байкал.

Е. Н. Тарасова проводит оценку многолетней изменчивости химического состава вод озера Байкал и его притоков [Галазий, Тарасова, 1991; Тарасова, 1998]. По итогам работ 1980–1985 гг. отмечено значительное изменение их химического состава, а также химического баланса в 1970–1980-е годы по сравнению с 1950-ми в связи с антропогенным воздействием на водоем [Тарасова, Мещерякова, 1992]. В рамках выполненных Е. Н. Тарасовой исследований во второй половине 1980-х годов была обнаружена обратная корреляция между зимним содержанием азота и весенней концентрацией хлорофилла *a* [Tarasova et al., 1998]<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Известно, что в естественных условиях при отсутствии загрязнения водоемов наблюдается прямая корреляция между содержанием биогенных элементов и концентрацией хлорофилла *a*.

Это позволило сделать вывод о наличии токсикантов в водах Байкала. Именно тогда впервые высказаны предположения, что такими веществами могли быть хлорорганические соединения, а одним из их источников – Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК), в технологии которого применялась хлорная отбелка целлюлозы. С 1989 г. Е. Н. Тарасова начала совместные с НПО «Тайфун» Госкомгидромета (г. Обнинск) исследования полихлорированных бифенилов (ПХБ) в поверхностных водах и донных отложениях озера и его притоков, а также в биоте Байкала (планктон, рыба и нерпа) [Тарасова и др., 1995]. Совместно с Башкортостанским региональным экологическим центром были расширены исследования по диоксидам и родственным соединениям в биоте озера Байкал, в продуктах производства и сточных водах БЦБК [Tarasova et al., 1999].

В начале 1990-х годов Евгения Николаевна начинает изучать параметры устойчивости экосистемы озера Байкал по состоянию водного гумуса озерного и речного происхождения; участвует в разработке и проведении комплексного изучения хлорорганических соединений в системе «атмосфера – растения – почва – вода – биота – донные отложения»; определяет критическую биогенную нагрузку как основу экотуризма на Байкале [Тарасова и др., 1995].

Изменение химического состава вод Байкала [Тарасова и др., 2006] в дальнейшем привело к количественным и качественным изменениям и в его биоте [Афанасьева, 1992; Настоящее..., 1996; Кожова и др., 1999; Watanabe, Drucker, 1999].

В последнее десятилетие произошедшие в литорали Байкала значительные изменения, включая развитие бентосных водорослей, гибель улиток и эндемичных губок, цветение бентосных цианобактерий, продуцирующих токсины, связывают с поступлением неочищенных сточных вод и токсичных промышленных загрязняющих веществ [Timoshkin et al., 2016].

В 1992 г. результаты многолетних исследований были обобщены во второй монографии «Современное состояние гидрохимического режима оз. Байкал» [Тарасова, Мещерякова, 1992], в которой проведена оценка изменений, произошедших в гидрохимическом режиме озера за период с 1950 по 1989 г.

В Институте геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН Е. Н. Тарасова возглавляла группу по изучению биогеохимии хлорорганических соединений в системе «атмосферный воздух –

атмосферные осадки – вода поверхностных водоемов – почва – донные отложения – биота наземных и водных экосистем Байкальского региона – биосубстраты человека». Она была ответственным исполнителем региональной программы «Диоксины». Эту работу Е. Н. Тарасова совмещала с изучением биогенных элементов и компонентов трофического статуса в воде ряда водных объектов (озера Байкал, Хубсугул, реки Ангара, Лена и др.) и макрокомпонентов ОВ (С, N, P) в почвах, торфяниках, донных отложениях и растениях [Тарасова, 1998; Tarasova et al., 1998; Тарасова и др., 2006, 2015–2018; Кузьмин и др., 2009, 2014 и др.]. Это дало возможность исследовать взаимосвязь распределения хлорорганических соединений и биогенных элементов [Tarasova et al., 1997a, Мамонтов и др., 2018].

Исследования хлорорганических соединений (полихлорированных дибензо-пара-диоксинов и дибензофуранов (ПХДД/Ф) и ПХБ) в 1990–2000-х годах проводились с учеными одной из ведущих в мире лабораторий по исследованию ПХДД/Ф (Университета г. Байройта, Германия). Впервые были получены данные о содержании ПХДД/Ф в жире байкальской нерпы, показавшие концентрации, сравнимые с таковыми в тюленях Балтийского моря [Tarasova et al., 1997b]. В рамках этой работы впервые проведены масштабные исследования ПХДД/Ф и ПХБ в биоте оз. Байкал, объектах окружающей среды (почвах, донных отложениях, твердом осадке снега и др.), продуктах питания и биосубстратах жителей Байкальского региона [Мамонтова и др., 2000; Mamontov et al., 2000; Полихлорированные..., 2005 и др.]. Большое внимание уделено биоаккумуляции стойких органических загрязнителей (СОЗ) (persistent organic pollutants) в пищевых цепях [Полихлорированные..., 2005]. Установлены уровни ПХБ и хлорорганических пестицидов в Байкале и на окружающей его территории и проведена оценка их негативного влияния на экосистему озера и на здоровье людей [Полихлорированные..., 2005].

В 2000–2010-х годах исследования СОЗ проводились совместно с учеными из институтов Иркутска, Москвы, Владивостока, Хабаровска, Якутска, Анадыря, Петропавловска-Камчатского, Магадана, а также Германии, Швеции, Финляндии, Монголии, Китая, Беларуси и др. [Mamontov et al., 2000; Полихлорированные..., 2005; Мамонтова и др., 2012 и др.]. При помощи глубоководных аппаратов «Мир» изучены донные отложения Байкала [Кузьмин и др., 2013].

Особо следует отметить грант РФФИ № 04-05-64870 «Геохимия органического вещества на стадии седиментогенеза в пелагиали Байкала», который Евгения Николаевна выполняла в 2004–2006 гг. Возобновившиеся гидрохимические исследования на глубоководной станции в 12 км от м. Половинный показали, что за последние 20 лет в Южном Байкале не восстановились естественные гидрохимические закономерности, нарушенные антропогенным влиянием 80-х годов [Тарасова и др., 2006].

Таким образом, основное направление исследований Е. Н. Тарасовой с 1960-х и до 1980-х годов можно охарактеризовать так: гидрохимия биогенных элементов и органического вещества воды оз. Байкал и его притоков, определение суммарного содержания и химического состава взвешенных веществ, хлорофилла *a*, косвенных показателей ОВ – цветности, перманганатной и бихроматной окисляемости, молекулярного состава ОВ (белки, липиды и углеводы) (рис. 3). С середины 1980-х гг. область ее исследований расширяется, она начинает изучать биогеохимию ОВ в природных и антропогенно измененных водных и наземных экосистемах (рис. 3) [Тарасова и др., 2012].

Е. Н. Тарасова на протяжении всей жизни изучала Байкал и доказывала, что, по гидрохимическим показателям и содержанию СОЗ в биоте, антропогенное влияние является реальным и несет опасность для экосистемы уникального водоема нашей планеты.

Общее число печатных и рукописных работ Е. Н. Тарасовой составляет 487, в него входят 4 монографии, 112 статей в журналах и глав в книгах, 41 карта в «Атласе Байкала» [1993]. Результаты ее исследований нашли применение при подготовке рекомендаций по охране природных ресурсов Байкала и его бассейна. Евгения Николаевна неоднократно предоставляла информацию для подготовки Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области» и Государственного доклада «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране».

Биогеохимические исследования макро- и микрокомпонентов ОВ в Байкале и Байкальском регионе, выполненные Е. Н. Тарасовой, находят свое продолжение в работах ученых разного профиля и используются для сравнения с современным состоянием природной среды не только Байкальского региона [Moore et al., 2009; Domyshcheva et al., 2019 и др.].

Научное наследие Е. Н. Тарасовой – фундаментальный вклад в изучение природы Байкала и охрану его экосистемы.

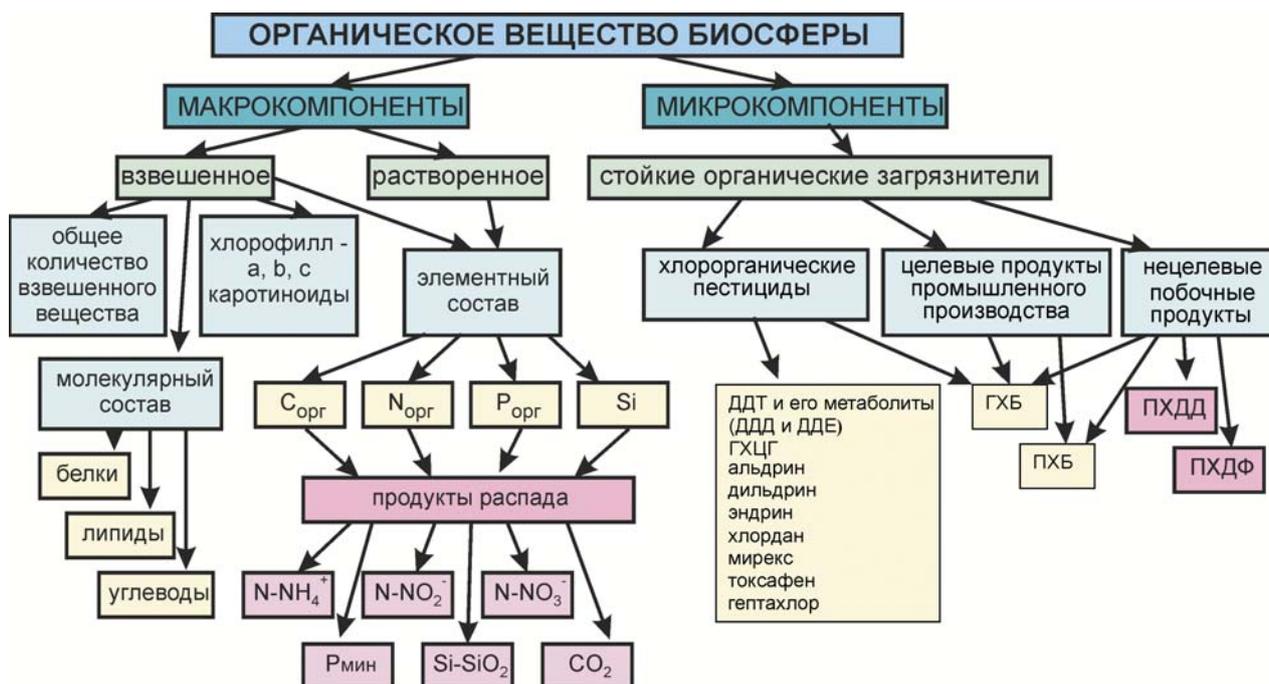


Рис. 3. Состав органического вещества в работах Е. Н. Тарасовой [Тарасова и др., 2012]

Fig. 3. Composition of organic matter in the studies of E. N. Tarasova [Tarasova et al., 2012]

## Литература

Атлас Байкала / Ред. Г. И. Галазий. М.: Роскартография, 1993. 160 с.

Афанасьева Э. Л., Игнатов А. В. Об изменении биомассы зоопланктона в озере Байкал // ДАН. 1992. Т. 324. С. 233–236.

Галазий Г. И., Тарасова Е. Н. Динамика биогенных элементов как показатель состояния экосистемы оз. Байкал // Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья: Мат-лы VI Всесоюзной байкальской школы-семинара. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 23–35.

Кожова О. М., Павлов Б. К., Пешкова Е. В., Святенко Г. С. Изменение видового состава фитопланктона Южного Байкала в период с 30-х до конца 90-х гг. и тенденции его перестройки // Проблемы экологии. Иркутск, 1999. С. 34–43.

Кузьмин М. И., Тарасова Е. Н., Бычинский В. А., Карabanов Е. Б., Мамонтов А. А., Мамонтова Е. А. Составляющие гидрохимического режима вод р. Лены // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 4. С. 440–451. doi: 10.1134/S0097807809040058

Кузьмин М. И., Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А., Мамонтов А. А., Кербер Е. В. Особенности сезонной и межгодовой изменчивости химического состава истока реки Ангары (Байкал) с 1950 по 2010 гг. // Геохимия. 2014. № 7. С. 579–589. doi: 10.7868/S0016752514070048

Кузьмин М. И., Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А., Мамонтов А. А., Хомутова М. Ю. Воздействие сточных вод и атмосферных выбросов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК)

на озеро Байкал // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 28. С. 51–57.

Личное дело Е. Н. Тарасовой ЛИН СО АН СССР // Архив ИНЦ СО РАН. Ед. хр. 10 3 633. 65 с.

Мамонтов А. А., Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А. Стойкие органические загрязнители в почвах южного Байкала // Экологическая химия. 2018. Т. 27, № 2. С. 65–75.

Мамонтова Е. А., Мамонтов А. А., Тарасова Е. Н. Загрязнение диоксинами и родственными соединениями окружающей среды Иркутской области (гигиенические аспекты проблемы). Методическое пособие. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2000. 48 с.

Мамонтова Е. А., Русинек О. Т., Мамонтов А. А. Евгения Николаевна Тарасова: Поступай по совести! Иркутск: Изд-во ИГ им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. 180 с.

Мамонтова Е. А., Тарасова Е. Н., Мамонтов А. А., Кузьмин М. И., Борисов Б. З., Бульбан А. П., Юрченко С. Г., Лепская Е. В., Левшина С. И., Трегубов О. Д. Стойкие органические загрязнители в атмосферном воздухе некоторых территорий Сибири и Дальнего Востока России // География и природные ресурсы. 2012. № 4. С. 40–47.

Настоящее и будущее Байкальского региона (возможности устойчивого развития). Ч. 1. Природный комплекс. Новосибирск: Студия Дизайн Инфолио, 1996. 112 с.

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) в Байкальском регионе: источники, дальний перенос и оценка риска (результаты гранта INTAS 2000-00140) / Отв. ред. М. И. Кузьмин. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. 52 с.

Тарасова Е. Н. Органическое вещество вод Южного Байкала: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Иркутск, 1973. 20 с.

Тарасова Е. Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука, 1975. 148 с.

Тарасова Е. Н. О соотношении органических и минеральных компонентов взвеси вод Южного Байкала // Гидробиологический журнал. 1972. Т. 8, № 1. С. 17–25.

Тарасова Е. Н. Компоненты трофического статуса в водах озер Байкал, Хубсугул и Телецкое // Сибирский экологический журнал. 1998. № 5. С. 383–390.

Тарасова Е. Н. Собственным примером // Григорий Иванович Галазий: Рыцарь Байкала. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 96–101.

Тарасова Е. Н. Содержание валового органического вещества в водах Байкала в период массового развития *Synedra acus* // ДАН СССР. 1979. Т. 246, № 5. С. 1278–1280.

Тарасова Е. Н., Вотивцев К. К. Динамика органических соединений азота и фосфора как показатель биотического круговорота веществ в Байкале // Гидробиологический журнал. 1971. Т. 7, № 6. С. 5–12.

Тарасова Е. Н., Безрукова Е. В., Мамонтова Е. А., Мамонтов А. А., Кузьмин М. И. Элементный состав органического вещества торфа как показатель трофического состояния болотных экосистем юга Байкальского региона // ДАН. 2016. Т. 470, № 1. С. 91–94. doi: 10.7868/S0869565216250204

Тарасова Е. Н., Коморникова Н. В., Мамонтов А. А., Мамонтова Е. А., Митрошков А. В. Об источниках поступления, миграции и устойчивости диоксинов и родственных им соединений в экосистеме Байкала // Диоксины: экологические проблемы и методы анализа: Мат-лы конф. (Уфа, 13–17 февр. 1995 г.). Уфа, 1995. С. 74–81.

Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А., Мамонтов А. А., Горегляд А. В., Цыпукова С. С., Ткаченко Л. Л. Пространственное распределение и временная изменчивость химического состава вод озера Хубсугул (Монголия) // Экологическая химия. 2017. Т. 26, № 2. С. 87–100.

Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А., Мамонтов А. А., Кузьмин М. И. Биогеохимические циклы макро- и микрокомпонентов органического вещества в оз. Байкал. Сообщение 1 // Современные проблемы геохимии: Мат-лы Всерос. совещания с участием иностранных ученых, посв. 95-летию со дня рождения академика Л. В. Таусона (Иркутск, 22–26 окт. 2012 г.). Т. 1. Иркутск, 2012. С. 191–194.

Тарасова Е. Н., Мамонтов А. А., Мамонтова Е. А., Кузьмин М. И. Некоторые параметры состояния экологической системы озера Байкал на основе анализа многолетних наблюдений // ДАН. 2006. Т. 409, № 5. С. 683–687.

Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А., Мамонтов А. А. Органическое вещество и биогенные элементы в объектах окружающей среды Ольхонского района Иркутской области // Экологическая химия. 2018. Т. 27, № 3. С. 141–155.

Тарасова Е. Н., Мамонтов А. А., Мамонтова Е. А. Факторы, определяющие современный гидрохими-

ческий режим Иркутского водохранилища // Вода: химия и экология. 2015. № 7. С. 10–17.

Тарасова Е. Н., Мещерякова А. И. Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1992. 144 с.

Domysheva V. M., Sorokovikova L. M., Sinyukovich V. N., Onishchuk N. A., Sakirko M. V., Tomberg I. V., Zhuchenko N. A., Golobokova L. P., Khodzher T. V. Ionic composition of water in Lake Baikal, its tributaries, and the Angara River source during the modern period // Russ. Meteorol. Hydrol. 2019. Vol. 44. P. 687–694. doi: 10.3103/S1068373919100078

Mamontov A. A., Mamontova E. A., Tarasova E. N., McLachlan M. S. Tracing the sources of PCDD/Fs and PCBs to Lake Baikal // Environ. Sci. Technol. 2000. Vol. 34, no. 5. P. 741–747. doi: 10.1021/es991047r

Moore M. V., Hampton S. E., Izmest'eva L. R., Silow E. A., Peshkova E. V., Pavlov B. K. Climate change and the world's 'Sacred Sea' – Lake Baikal, Siberia // BioScience. 2009. Vol. 59, no. 5. P. 405–417. doi: 10.1525/bio.2009.59.5.8

Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Amirova Z. PCDD/Fs in sewage and some products of Baikal pulp and paper mill (BPPM) // Organohalogen Compounds. 1999. Vol. 43. P. 429–432.

Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Galazy G. I. Correlation of PCB concentration with component of trophic status in Lake Baikal // Organohalogen compounds. 1997a. Vol. 32. P. 263–267.

Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Klasmeier J., McLachlan M. S. Polychlorinated dibenzop-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) in Baikal seal // Chemosphere. 1997b. Vol. 34, no. 11. P. 2419–2427. doi: 10.1016/S0045-6535(97)00088-X

Tarasova E. A., Mamontov A. A., Mamontova E. A. Pollution and eutrophication in Lake Baikal // J. Lake Sci. 1998. Vol. 10, Suppl. P. 167–179. doi: 10.18307/1998.sup20

Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M., Moore M. V., Belykh O. I., Malnik V. V., Sakirko M. V., Shirokaya A. A., Bondarenko N. A., Domysheva V. M., Fedorova G. A., Kochetkov A. I., Kuzmin A. V., Lukhnev A. G., Medvezhonkova O. V., Nepokrytykh A. V., Pasyukova E. M., Poberezhnaya A. E., Potapskaya N. V., Rozhkova N. A., Sheveleva N. G., Tikhonova I. V., Timoshkina E. M., Tomberg I. V., Volkova E. A., Zaitseva E. P., Zvereva Yu. M., Kupchinsky A. B., Bukshuk N. A. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // J. Great Lakes Res. 2016. Vol. 42, no. 3. P. 487–497. doi: 10.1016/j.jglr.2016.02.011

Watanabe Y., Drucker V. V. Phytoplankton blooms in Lake Baikal, with reference to the Lake's present state of eutrophication // Ancient Lake: their Cultural and Biological Diversity. 1999. P. 217–225.

## References

Afanas'eva E. L., Ignatov A. V. On the change of biomass of the zooplankton in Lake Baikal. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Academy of Sciences*. 1992;324:233–236. (In Russ.)

Domysheva V. M., Sorokovikova L. M., Sinyukovich V. N., Onishchuk N. A., Sakirko M. V., Tomberg I. V., Zhuchenko N. A., Golobokova L. P., Khodzher T. V. Ionic composition of water in Lake Baikal, its tributaries, and the Angara River source during the modern period. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2019;44:687–694. doi: 10.3103/S1068373919100078

Galazii G. I. (ed.). Atlas of Baikal. Moscow: Roskartografiya; 1993. 160 p. (In Russ.)

Galazii G. I., Tarasova E. N. The dynamics of biogenic elements as an indicator of the ecosystem condition of Lake Baikal. *Monitoring i otsenka sostoyaniya Baikala i Pribaikal'ya: Materialy VI Vsesoyuznoi baikal'skoi shkoly-seminara = Monitoring and assessment of condition of Lake Baikal and the Baikal region: Proceeding of VI All-Union Baikal school-seminar.* Leningrad; 1991. P. 23–35. (In Russ.)

Kozhova O. M., Pavlov B. K., Peshkova E. V., Svyatenko G. S. The variation of species composition of phytoplankton in southern Lake Baikal in the period since 1930s till the end of 1990s and tendencies of its restructuring. *Problemy ekologii = Problems of Ecology.* Irkutsk; 1999. P. 34–43. (In Russ.)

Kuzmin M. I. (ed.). Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Lake Baikal region: sources, long-range transport and risk assessment (results of grant INTAS 2000-00140). Irkutsk: IG SB RAS; 2005. 52 p. (In Russ.)

Kuzmin M. I., Tarasova E. N., Bychinskii V. A., Karabanov E. B., Mamontov A. A., Mamontova E. A. Hydrochemical regime components of Lena water. *Water Resources.* 2009;36(4):418–430. doi: 10.1134/S0097807809040058

Kuzmin M. I., Tarasova E. N., Mamontova E. A., Mamontov A. A., Khomutova M. Yu. The impact of sewage water and emissions of Baikal pulp and paper mill (BCBK) on Lake Baikal. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University.* 2013;28:51–57. (In Russ.)

Kuzmin M. I., Tarasova E. N., Mamontova E. A., Mamontov A. A., Kerber E. V. Seasonal and interannual variations of water chemistry in the headwater streams of the Angara River (Baikal) from 1950 to 2010. *Geochemistry International.* 2014;52(7):523–532. doi: 10.1134/S0016702914070040

Mamontov A. A., Mamontova E. A., Tarasova E. N., McLachlan M. S. Tracing the sources of PCDD/Fs and PCBs to Lake Baikal. *Environ. Sci. Technol.* 2000;34(5):741–747. doi: 10.1021/es991047r

Mamontova E. A., Mamontov A. A., Tarasova E. N. Pollution with dioxins and related compounds of the Irkutsk Region environment (hygienical aspects of the problem). A reference book. Irkutsk: IG SB RAS; 2000. 48 p. (In Russ.)

Mamontova E. A., Rusinek O. T., Mamontov A. A. Eugenia Nikolaevna Tarasova: Act according to your conscience! Irkutsk: IG SB RAS; 2018. 180 p. (In Russ.)

Mamontova E. A., Tarasova E. N., Mamontov A. A., Kuz'min M. I., Borisov B. Z., Bul'ban A. P., Yurchenko S. G., Lepskaya E. V., Levshina S. I., Tregubov O. D. Persistent organic pollutants in atmospheric air of some territories of Siberia and Russian Far East. *Geography and Natural Resources.* 2012;4:40–47. (In Russ.)

Mamontov A. A., Tarasova E. N., Mamontova E. A. Persistent organic pollutants in soils of southern Baikal. *Russ. J. General Chemistry.* 2018;88(13):2862–2870. doi: 10.1134/S1070363218130066

Moore M. V., Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Silov E. A., Peshkova E. V., Pavlov B. K. Climate change and the world's 'Sacred Sea' – Lake Baikal, Siberia. *BioScience.* 2009;59(5):405–417. doi: 10.1525/bio.2009.59.5.8

Personnel file of E. N. Tarasova. LI SB AS SSSR. *Archive ISC SB RAS.* St. un. 10 3 633. 65 p. (In Russ.)

Present and future of the Baikal region (opportunities for sustainable development). Part 1. Natural complex. Novosibirsk: Studiya Dizain Infolio; 1996. 112 p. (In Russ.)

Tarasova E. N. By own example. *Grigoriy Ivanovich Galazii: Rytsar' Baikala = Grigory Ivanovich Galaziy: Knight of Baikal.* Novosibirsk: SB RAS; 2004. P. 96–101. (In Russ.)

Tarasova E. N. Components of trophic status in the waters of Lakes Baikal, Khubsugul and Teletskoye. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Siberian J. of Ecology.* 1998;5:383–390. (In Russ.)

Tarasova E. N. Content of gross organic matter in the waters of Lake Baikal during the period of mass development of *Synedra acus*. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR.* 1979;246(5):1278–1280. (In Russ.)

Tarasova E. N. Organic matter in the waters of Southern Baikal: Summary of PhD (Cand. of Chem.) thesis. Irkutsk; 1973. 20 p. (In Russ.)

Tarasova E. N. Organic matter in the waters of Southern Baikal. Novosibirsk: Nauka; 1975. 148 p. (In Russ.)

Tarasova E. N. On the ratio of organic and mineral components of suspended water in Southern Baikal. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Hydrobiological Journal.* 1972;8:17–25. (In Russ.)

Tarasova E. N., Meshcheryakova A. I. Current state of the hydrochemical regime of Lake Baikal. Novosibirsk: Nauka; 1992. 144 p. (In Russ.)

Tarasova E. N., Votintsev K. K. Dynamics of organic compounds of nitrogen and phosphorus as an indicator of the biotic cycle of substances in Baikal. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Hydrobiological Journal.* 1971;7(6):5–12. (In Russ.)

Tarasova E. N., Bezrukova E. V., Mamontova E. A., Mamontov A. A., Kuzmin M. I. Elemental composition of peat organic matter as an indicator of trophic conditions of marsh ecosystems in the south of the Baikal region. *Doklady Earth Sciences.* 2016;470(1):946–949. doi: 10.1134/S1028334X16090063

Tarasova E. N., Komornikova N. V., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Mitroshkov A. V. On the sources, migration and stability of dioxins and related compounds in the Baikal ecosystem. *Dioksiny: ekologicheskie problemy i metody analiza: mat-ly konf. (Ufa, 13-17 fevr. 1995 g.) = Dioxins: environmental problems and methods of analysis: Proceed. conference (Ufa, Feb. 13-17, 1995).* Ufa; 1995a. P. 74–81. (In Russ.)

Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Amirova Z. PCDD/Fs in sewage and some products of Baikal pulp and paper mill (BPPM). *Organohal. Comp.* 1999;43:429–432.

Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A. Factors determining the modern hydrochemical regime of the Irkutsk reservoir. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: Chemistry and Ecology*. 2015;7:10–17. (In Russ.)

Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Galazy G. I. Correlation of PCB concentration with component of trophic status in Lake Baikal. *Organohal. Comp.* 1997a;32:263–267.

Tarasova E. N., Mamontova E. A., Mamontov A. A., Goreglyad A. V., Tsypukova S. S., Tkachenko L. L. The spatial distribution and time changeability of chemical composition of water of Lake Hovsgol (Mongolia). *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry*. 2017;26(2):87–100. (In Russ.)

Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Klasmeier J., McLachlan M. S. Polychlorinated dibenzop-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) in Baikal seal. *Chemosphere*. 1997b;34(11):2419–2427. doi: 10.1016/S0045-6535(97)00088-X

Tarasova E. N., Mamontova E. A., Mamontov A. A., Kuzmin M. I. Biogeochemical cycles of macro- and microcomponents of organic matter in Lake Baikal. Report 1. *Sovremennye problemy geokhimii: mat-ly Vse-ros. soveshchaniya s uchastiem inostrannykh uchenykh, posv. 95-letiyu so dnya rozhdeniya akademika L. V. Tausona (Irkutsk, 22–26 okt. 2012 g.) = Modern problems of geochemistry: Proceed. All-Russian meeting with int. participation, dedicated to the 95<sup>th</sup> anniversary of the birth of Academician L. V. Tauson (Irkutsk, Oct. 22–26, 2012)*. Vol. 1. Irkutsk; 2012. P. 191–194. (In Russ.)

Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontova E. A., Kuzmin M. I. Some parameters of the state of the Lake Baikal ecosystem inferred from long-term observation. *Doklady Earth Sciences*. 2006;409A(6):973–977. doi: 10.1134/s1028334x06060316

Tarasova E. N., Mamontova E. A., Mamontov A. A. The organic matter and nutrients in environmental media of the Olkhon District of the Irkutsk Region. *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry*. 2018;27(3): 141–155. (In Russ.)

Tarasova E. A., Mamontov A. A., Mamontova E. A. Pollution and eutrophication in Lake Baikal. *J. Lake Sci.* 1998;10(suppl.):167–179. doi: 10.18307/1998.sup20

Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M., Moore M. V., Belykh O. I., Malnik V. V., Sakirko M. V., Shirokaya A. A., Bondarenko N. A., Domysheva V. M., Fedorova G. A., Kochetkov A. I., Kuzmin A. V., Lukhnev A. G., Medvezhonkova O. V., Nepokrytykh A. V., Pasyukova E. M., Poberezhnaya A. E., Potapovskaya N. V., Rozhkova N. A., Sheveleva N. G., Tikhonova I. V., Timoshkina E. M., Tomberg I. V., Volkova E. A., Zaitseva E. P., Zvereva Yu. M., Kupchinsky A. B., Bukshuk N. A. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *J. Great Lakes Res.* 2016;42(3):487–497. doi: 10.1016/j.jglr.2016.02.011

Watanabe Y., Drucker V. V. Phytoplankton blooms in Lake Baikal, with reference to the Lake's present state of eutrophication. *Ancient Lake: their Cultural and Biological Diversity*. 1999. P. 217–225.

Поступила в редакцию / received: 26.12.2023; принята к публикации / accepted: 27.02.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Русинек Ольга Тимофеевна

д-р биол. наук, главный научный сотрудник  
e-mail: rusinek@isc.irk.ru

### Мамонтова Елена Анатольевна

канд. мед. наук, старший научный сотрудник  
e-mail: elenam@igc.irk.ru

## CONTRIBUTORS:

### Rusinek, Olga

Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher

### Mamontova, Elena

Cand. Sci. (Med.), Senior Researcher

## ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛИМНОЛОГИЯ В РОССИИ», ПОСВЯЩЕННАЯ 80-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН (Санкт-Петербург, 12–14 февраля 2024 г.)

Всероссийская научная конференция «Лимнология в России» проведена в рамках мероприятий, посвященных 300-летию Российской академии наук. Конференция также приурочена к 80-летию Института озераведения РАН. Организаторы конференции – Институт озераведения РАН, Отделение наук о Земле РАН и Русское географическое общество. В программный комитет конференции входили представители Отделения наук о Земле РАН (Москва), Русского географического общества (Санкт-Петербург), Института озераведения РАН – СПб ФИЦ РАН (Санкт-Петербург), НИЛ озераведения БГУ (Минск), ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» (Минск), Зоологического института РАН (Санкт-Петербург), Института водных проблем РАН (Москва), Института географии РАН (Москва), МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва), Лимнологического института СО РАН (Иркутск), Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН (Борок), Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН (Москва), Института исследований континентальных водных объектов РГГМУ (Санкт-Петербург). Данное мероприятие соответствует задачам «Десятилетия науки и технологий 2022–2031». Конференция проведена в очно-дистанционном формате.

Открыла конференцию д. г. н., член-корр. РАН, директор Института географии РАН О. Н. Соломина. С приветственным словом к участникам обратились к. г. н., заместитель академика-секретаря ОНЗ РАН по научно-организационной работе И. Н. Сократова; председатель Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической

безопасности Санкт-Петербурга А. В. Герман; зам. министра природных ресурсов и экологии Республики Карелия П. М. Николаевский; д. г. н., проф., член-корр. РАН Н. Н. Филатов; д. г.-м. н., директор Лимнологического института СО РАН А. П. Федотов; д. г. н., директор Института исследований континентальных водных объектов РГГМУ Ш. Р. Поздняков; к. б. н., руководитель Санкт-Петербургского филиала ФГБНУ «ВНИРО» (ГосНИОРХ им. Л. С. Берга) М. М. Мельник; д. г.-м. н., и. о. директора НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН А. А. Тронин; к. г. н., директор ГГИ С. А. Журавлев; д. т. н., проф. РАН, и. о. директора СПб ФИЦ РАН А. Л. Ронжин. Также приветствия участникам конференции и поздравления с юбилеем Института озераведения прислали Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Департамент координации деятельности научных организаций Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Комитет по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

Современная тематика исследований Института озераведения РАН определила основные направления работы конференции. Были представлены 124 доклада, в том числе 91 очный, 9 дистанционных и 24 стендовых по нескольким актуальным направлениям, объединенным в следующие секции:

- Общие проблемы лимнологии и прикладные исследования;
- Гидробиологические и ихтиологические исследования озер;
- Химия воды и донных отложений озер;
- Палеолимнологические исследования;

- Современные изменения климата и гидрологические процессы в крупных озерах;
- Моделирование гидрологических и биогеохимических процессов в озерах.

География участников конференции – Российская Федерация и Республика Беларусь. Это более 200 человек из 18 городов и 48 научных и образовательных учреждений, органов государственной власти Российской Федерации и субъектов Российской Федерации, в числе которых Отделение наук о Земле РАН, Санкт-Петербургское отделение РГО, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН с подразделениями Институт озероведения РАН и Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Институт водных проблем РАН, Институт географии РАН, Институт зоологии РАН, Институт биологии внутренних вод РАН, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Лимнологический институт Сибирского отделения (СО) РАН, Тюменский научный центр СО РАН, Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Институт биофизики СО РАН, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН, Геологический институт Кольского научного центра РАН, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, Институт водных проблем Севера ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии с филиалами, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Белорусский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный университет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Ленинградский государственный университет им. А. С. Пушкина, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Российский государственный гидрометеорологический

университет, Вологодский государственный университет, Удмуртский государственный университет, Тюменский государственный университет, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Волжско-Камский государственный заповедник, ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга, Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия.

Пленарное заседание проходило 12 февраля в здании Санкт-Петербургского отделения Русского географического общества. На нем было заслушано и обсуждено 12 докладов. В докладах Н. Н. Филатова и С. А. Кондратьева представлены основные этапы 80-летней истории Лаборатории, а затем Института озероведения. Результаты многолетнего сотрудничества ИНОЗ и лимнологов Белорусского и Вологодского университетов рассмотрены в докладах Б. П. Власова и Н. Л. Болотовой. Доклад О. Н. Соломиной посвящен изучению зависимости динамики ледников от климатических изменений за последние 2 тыс. лет, выявленной на основе анализа озерных осадков. Обзор современного состояния лимнологических исследований оз. Байкал и перспективы их новых направлений представлены в докладе А. П. Федотова. Палеолимнологические аспекты исследований в нашей стране отражены в докладе В. Д. Страховенко. Результаты совместных исследований ИАЭП и ИНОЗ в области моделирования внешней биогенной нагрузки на водные объекты рассмотрены в докладе А. Ю. Брюханова. М. А. Науменко изложил вопросы, связанные с прогрессом в области исследований возможных изменений термической структуры Ладожского озера под влиянием климатических воздействий. Перспективы внедрения альгицидов нового поколения в практику реабилитации и защиты водоемов от цианобактериального «цветения» представлены в докладе Е. А. Курашова. Аспекты дистанционной оценки характеристик неизученных озер Арктической зоны Российской Федерации освещены в докладе С. А. Кондратьева. В докладе Ш. Р. Позднякова нашли отражение существующие проблемы, связанные с воздействием наносов на функционирование лимнических систем.

Секционные заседания в очно-дистанционном формате проходили 13–14 февраля в здании Института озероведения РАН.

На секции «Общие проблемы лимнологии. Прикладные исследования» (председатели к. б. н. О. Я. Глибко, к. б. н. Д. С. Дудакова) представлено и обсуждено 18 докладов, в том числе три дистанционных и пять стендовых. Тематика докладов охватывала целый спектр вопросов, в частности:

- проблемы изучения соленых озер и практики применения их ресурсов в хозяйственной и рекреационной деятельности (доклады Е. С. Задереева и др., Институт биофизики СО РАН – ФИЦ КНЦ СО РАН; А. Н. Егорова, ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН; С. И. Шапоренко, ИГ РАН);

- проблемы теории эволюции гидроэкосистем (доклад П. С. Лопуха, БГУ);

- оценку экологического состояния водоемов с использованием различных подходов, в том числе дистанционных методов (доклады А. Л. Рижинашвили, СПб ИИЕТ; О. Н. Ериной, МГУ им. М. В. Ломоносова, и др.; С. И. Вокуюевой, ИППЭС КНЦ РАН, Ю. М. Банниковой, ИППЭС КНЦ РАН; Е. Ю. Казаковой и А. С. Семеновой, АтлантНИРО; Д. С. Дудаковой, ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН);

- экологические проблемы, связанные с загрязнением озер (доклады Д. А. Тихоновой, ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, и др.; К. М. Зариновой и Д. А. Тихоновой, ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, А. Е. Лапенкова и др., ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН);

- правовые и организационно-технические вопросы сохранения и восстановления водных экосистем и популяций гидробионтов (доклады О. Я. Глибко, ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН; А. Н. и О. Ю. Глызиных, Лимнологический институт СО РАН);

- использование озерных ресурсов, в частности сапропеля, для нужд сельского хозяйства и медицины (доклад А. С. Митюкова, ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН).

Все заслушанные доклады представляли исследования, выполненные на высоком научном уровне. В ходе дискуссии обсуждался теоретический вопрос нижней границы солености соленых озер. В целом участниками секции отмечена широкая тематика поднимаемых вопросов, которые позволяют всесторонне охватить практически все встающие перед учеными-лимнологами проблемы. Также отмечена необходимость более активного внедрения результатов научных исследований для развития народного хозяйства и применения природных ресурсов, учитывая необходимость сохранения природной среды и создания активно и адекватно функционирующей законодательной и норматив-

ной базы с учетом всех имеющихся научных рекомендаций.

На секции «Гидробиологические и ихтиологические исследования озер» (председатели д. б. н., проф. Е. А. Курашов, к. б. н., доц. В. П. Беляков) представлено и обсуждено 29 докладов, связанных с разноплановыми гидробиологическими и ихтиологическими исследованиями озерных и озерно-речных экосистем. Затронуты разнообразные аспекты изучения гидробиоценозов, от систематики и фаунистики водных организмов до использования различных методов математического и статистического анализа для обработки полученных данных. Все заслушанные доклады представляли исследования, выполненные на высоком научном уровне. Вместе с тем при обсуждении участники секции отметили, что на развитии отечественных гидробиологических исследований внутренних водоемов крайне негативно сказывается недостаточность их финансирования и отсутствие соответствующего научного оборудования, необходимого для выполнения исследований, отвечающих самым современным мировым стандартам гидробиологической науки. Также говорилось о том, что значительно сократилось число экспериментальных работ и работ, связанных с исследованиями функциональных и популяционных аспектов жизни гидробионтов. Практически перестали выполняться важнейшие балансовые и продукционные исследования, что связано прежде всего с потерей комплексности исследований и их недостаточной финансовой и материально-приборной обеспеченностью. Кроме того, негативно сказывается недостаток специалистов по изучению отдельных сообществ и групп гидробионтов. Подчеркнуто, что до сих пор в вузах не ведется подготовка исследователей лимнологического профиля, несмотря на то, что озерные экосистемы представляют собой важнейший природный ресурс, а их изучение в целях рационального природопользования является важнейшей государственной задачей.

На секции «Химия воды и донных отложений озер» (председатели д. г. н. Н. А. Белкина, к. г. н. Н. В. Игнатъева) к обсуждению было представлено 13 устных и 4 стендовых доклада о результатах исследования гидрохимических и геохимических аспектов разномасштабных пресноводных экосистем. Несколько докладов посвящались изучению двух крупнейших озер Европы – Ладожского (Т. Н. Петрова и др., ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН; М. А. Гусева и др., ГосНИОРХ им. Л. С. Берга) и Онежского (Г. С. Бородулина и др., ИВПС КарНЦ РАН).





В дискуссии говорилось о необходимости более широкого привлечения гидробиологических данных относительно фито- и бактериопланктона, а также водных грибов для поиска причин выявленных изменений гидрохимического режима Ладожского озера. Большой интерес вызвали два доклада о гидрохимии меромиктических озер (А. А. Чупакова и др. и Н. М. Кокрятская и др., ФБГУН ФИЦКИА УрО РАН). Данный тип озер еще недостаточно изучен, поэтому было высказано пожелание более глубокого и всестороннего их рассмотрения, включая гидрологические и гидробиологические аспекты. Ряд докладов касались изучения отдельных аспектов гидрохимического режима озер Волжско-Камского заповедника (Е. Н. Унковская и др., «Волжско-Камский государственный заповедник»), Можайского водохранилища (Д. И. Соколов и др., МГУ им. М. В. Ломоносова), озер Московского региона (С. И. Полухин и др., МГУ им. М. В. Ломоносова). Презентация Н. В. Игнатъевой (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН) посвящалась закономерностям и особенностям гидрохимического режима озерно-речных систем Западного Приладожья, выявленным с применением ландшафтного подхода. Определенный интерес вызвала презентация Н. В. Кулик и др. (ИВПС КарНЦ РАН) о гидрохимии снежного покрова бассейна Онежского озера. Исследование, выполненное К. В. Титовой и др. (ФИЦКИА УрО РАН), имело чисто практическую направленность – в нем дана оценка пригодности оз. Святого для выращивания форели. Шесть докладов были посвящены геохимическим исследованиям донных отложений озер. Важную теоретическую значимость для понимания процессов раннего диагенеза имеют результаты относительно формирования донных отложений озер Карелии, представленные в докладе Н. А. Белкиной (ИВПС КарНЦ РАН). Большой интерес вызвали доклады А. В. Гузевой (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН) и З. И. Слуковского и др. (Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН) о гуминовом веществе донных отложений полярных регионов и геохимических особенностях озер Антарктиды. Два доклада были посвящены проблемам загрязнения – это доклады Е. С. Колпаковой и др. (ФИЦКИА УрО РАН) о хлорорганических соединениях в озерных экосистемах на разных стадиях отделения от Белого моря и Г. И. Кухаревой (НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН) об оловоорганических соединениях в донных отложениях Ладожского озера.

Участники секции высоко оценили уровень ее работы. При обсуждении докладов неодно-

кратно звучали призывы к объединению специалистов различных организаций для проведения совместных комплексных исследований ряда озер с целью разрешения той или иной проблемы.

На секции «Палеолимнологические исследования» (председатели к. г. н. Т. В. Сапелко, д. г. н. Д. А. Субетто) в 20 устных очных докладах, 2 дистанционных и 4 стендовых были затронуты актуальные проблемы палеолимнологии. С обзором современных комплексных палеолимнологических исследований с историческим аспектом выступили Т. В. Сапелко (ИНОЗ РАН), Д. В. Севастьянов (ЛГУ им. А. С. Пушкина), А. Е. Рыбалко (ВНИИОкеангеология), А. В. Панин (ИГ РАН). Доклады секции были посвящены исследованиям как больших (Ладожское, Онежское, Арал, Ханка, Каспийское море), так и малых озер (озера Северо-Запада и Центральной России, Кольского полуострова, Таймыра, Сибири). Новые интересные результаты по истории оз. Неро за последние 15 тысяч лет представлены Е. А. Константиновым (ИГ РАН). Заслушан доклад А. И. Рудинской (ИГ РАН) об изучении палеоводоемов позднеледниковья на Самбийском полуострове. Палеоэкологии озер степей Центральной Азии в голоцене посвящен дистанционный доклад О. И. Баженовой (Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН). О вертикальных движениях северо-восточной части Фенноскандии в голоцене рассказывал Д. С. Толстобров (ГИ КНЦ РАН). Оригинальное исследование озер, затопленных водохранилищ представил Л. В. Разумовский (ИВП РАН). Исследованиям распределения  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , а также других радионуклидов в донных отложениях озер посвящены доклады В. Д. Страховенко (ИГМ СО РАН) и Н. В. Кузьменковой (МГУ им. М. В. Ломоносова); изучению донных отложений озер с помощью палинологического метода – доклады О. К. Борисовой и Е. Ю. Новенко (ИГ РАН), М. Б. Носовой (ГБС РАН), А. П. Фоменко («ВСЕГЕИ», БИН РАН); диатомовому анализу донных отложений озер – доклады А. Н. Толстобровой (ГИ КНЦ РАН), А. Л. Косовой (ИППЭС КНЦ РАН), А. В. Лудиковой (ИНОЗ РАН). Об изучении в озерных отложениях остракод и кладоцер рассказали соответственно молодые специалисты А. А. Ткач и Ю. А. Пастухова (МГУ им. М. В. Ломоносова). Д. Д. Кузнецов (ИНОЗ РАН) представил доклад по литологическим проблемам изучения озер, а А. В. Пивовар (РГПУ им. А. И. Герцена) – по георадарным исследованиям озер. На стендовой сессии большой интерес вызвали палеолимнологические доклады молодых ученых Т. Ю. Газизовой (ИНОЗ РАН), Л. В. Шашерина

и К. Г. Филипповой (ИГ РАН) и М. И. Нестерова (ТюмНЦ СО РАН).

Участники секции отметили появление новых перспективных направлений работы в области палеолимнологии, появление многочисленных новых результатов исследований озер России, требующих обобщений. В связи с этим предложено продолжить серийное издание монографии «История озер». Одобрены многочисленные доклады молодых специалистов, выполненные на высоком научном уровне. Основной отмечаемой проблемой палеолимнологических исследований в настоящее время является труднодоступность радиоуглеродного датирования изучаемых отложений.

На секции «Современные изменения климата и гидрологические процессы в крупных озерах» (председатели д. г. н., проф. М. А. Науменко, к. г. н. Г. Э. Здравеннова) заслушано и обсуждено восемь докладов, в том числе один дистанционный и один стендовый. Представлены результаты исследований озер Карелии, Бурейского водохранилища, Кроноцкого озера, а также искусственных водоемов западного побережья Калининградской области.

В докладах по карельским озерам продемонстрированы статистически значимые положительные тренды температуры воздуха и поверхности воды на озерах этого региона, обсуждались проблемы оценки эффективности перемешивания мелководного озера. Изменений устойчивости малого карельского озера на современном этапе (15 лет наблюдений) не выявлено, сделан вывод о необходимости продолжения измерений. Установлены достоверные тренды сокращения продолжительности периода ледостава на карельских озерах за 70-летний период, сокращение толщины и изменение структуры льда озер Карелии (увеличение доли белого льда) за 25-летний период. Отмечены перспективы практического использования результатов работы В. В. Гузиватого и М. А. Науменко по оценке течений на поверхности крупных озер по последовательным инфракрасным космическим снимкам, предоставляющим возможность охвата больших акваторий. Несомненный интерес представляют доклады по температурному режиму Бурейского водохранилища и Кроноцкого озера с особым вниманием на процессы в гиполимнионе. Чрезвычайно полезным было обсуждение представленных презентаций, демонстрирующее взаимное желание конкретизировать и совершенствовать методики лимнологических измерений и их анализа.

В ходе обсуждения секционных докладов отмечалось, что для исследования реакции озерных экосистем на наблюдаемую климатическую

изменчивость необходимы длительные ряды измерений гидрофизических и химико-биологических параметров на озерах с применением автономных станций. Препятствием является санкционное давление и значительное повышение цен на гидрологическое оборудование.

На секции «Моделирование гидрологических и биогеохимических процессов в озерах» (председатель д. ф.-м. н. С. А. Кондратьев) представлено и обсуждено 7 докладов, связанных с детерминированным моделированием процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор – водоем». Вопросы моделирования внешней биогенной нагрузки на Чебоксарское водохранилище рассмотрены в докладе С. В. Ясинского и др. (ИГ РАН). Большинство докладов посвящены математическому описанию абиотических внутриводоемных процессов Рыбинского водохранилища, Ладожского озера, озер и водохранилищ Московской области. Это доклады К. А. Подгорного и др. (АтлантНИРО), С. Д. Голосова (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН), И. С. Зверева (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН) и М. А. Терешинной и др. (МГУ им. М. В. Ломоносова). Во втором докладе К. А. Подгорного и др. и в докладе Ю. С. Доценко (МГУ им. М. В. Ломоносова) представлен опыт экосистемного моделирования для Вислинского залива, Невской губы и Можайского водохранилища. Все работы выполнены на высоком научном уровне и заслуживают положительной оценки. Несомненный интерес представляют результаты оценок возможных изменений термического режима озер в ходе предполагаемой реализации RCP-сценариев изменения климата, представленные в докладе М. А. Терешинной. Дополнительного осмысления требует факт значительного увеличения числа параметров (более 300), определяемых в результате калибровки достаточно сложной экосистемной модели Вислинского залива. Общим недостатком представленных докладов является невнимание к разработанным ранее моделям и отсутствие сравнительного анализа.

При обсуждении докладов участники секции отмечают, что на развитии отечественных методов математического моделирования природных процессов и систем крайне негативно сказывается отсутствие необходимого информационного обеспечения. Система государственного мониторинга водных объектов в настоящее время фактически работает сама на себя и позволяет давать оценки типа «хорошо – плохо» лишь в небольшом количестве пунктов измерений, сохранившихся от прежней системы мониторинга. Даже скудные данные выполненных измерений не публикуются,

продаются за баснословные суммы и недоступны широкому кругу ученых и специалистов. При этом качество получаемой информации не контролируется извне и оставляет желать лучшего. Отсутствуют общедоступные базы данных, содержащие результаты государственного мониторинга. Поэтому неудивительно, что до сих пор калибровка и верификация разработанных отечественных моделей часто проводятся по данным натурных наблюдений 1970–80-х годов.

Поступившие на конференцию материалы опубликованы в сборнике тезисов <https://limno.ru/developments/papers/abstracts-limnology-in-russia/> (Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Лимнология в России», посвященной 80-летию Института озераведения Российской академии наук. Санкт-Петербург, 12–14 февраля 2024 г. / Коллектив авторов, РАН. – СПб.: РАН, 2024. – 182 с. <https://doi.org/10.12731/978-5-907645-54-7>).

В целом участники конференции высоко оценили ее уровень и порекомендовали сделать проведение конференции «Лимнология в России» регулярным.

По итогам пленарных и секционных заседаний, а также дискуссий участники конференции постановили:

- Одобрить в целом результаты конференции, отметить ее актуальность и научно-практическую направленность.

- Рекомендовать результаты научных исследований, представленные в 23 докладах, к публикации в научных журналах «Труды Карельского научного центра РАН» (серия «Лимнология и океанология»), «Гидрометеорология и экология», а также «Limnology and Freshwater Biology».

- Активизировать на разных уровнях проведение научных исследований по вопросам комплексного изучения водных объектов и их водосборов с целью совершенствования подходов к охране и научно обоснованному рациональному использованию водных ресурсов, в том числе исследовать гидрологические аспекты трансформации вещества и энергии в разнотипных водных объектах в условиях изменяющегося климата; разработать теорию эволюции, функционирования, устойчивости и восстановления озер в различных географических зонах; провести оценку природно-ресурсного потенциала озерного фонда России с прогнозом тенденций его изменения с учетом

социально-экономического развития регионов; продолжить развитие палеолимнологических исследований, по результатам которых восстановить выпуск серии монографий «История озер», продолжить разработку рекомендаций по принятию мер, направленных на сохранение Онежского и Ладожского озер как уникальных природных объектов и крупнейших пресноводных озер в Европе.

- Обратит внимание на необходимость совершенствования подготовки специалистов по направлениям «лимнология», «гидрофизика», «гидрохимия», «гидробиология» с учетом современных тенденций развития цифровой экономики.

- Признать необходимым более активное вовлечение в научно-исследовательскую деятельность молодых исследователей (студентов, магистрантов, аспирантов, начинающих педагогов).

- Руководителям институтов лимнологического профиля (ИНОЗ РАН, ИВПС КарНЦ РАН, ЛИН СО РАН, ИБВВ РАН, ИГ РАН и др.) подготовить обращение в ВАК РФ и Минобрнауки с целью определения специальности «лимнология» для защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата (доктора) географических наук, а также формирования соответствующих кафедр и специальностей в университетах и вузах России.

- Разместить на официальном сайте ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН информацию о результатах работы конференции.

Кроме того, конференция обращается с предложением к Академии наук Республики Татарстан (Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан) провести в 2025 году в Казани III Конференцию «Озера Евразии» с участием представителей стран СНГ (Таджикистана, Узбекистана, Азербайджана, Армении, Беларуси, Казахстана, Кыргызстана), а также партнеров по научному сотрудничеству из стран БРИКС Китая и Индии. Полагаем, что проведение специализированной международной конференции с участием ведущих специалистов России и зарубежных стран послужит мощным дополнительным стимулом для более широкого развития научных исследований водных объектов Евразии.

*С. А. Кондратьев*

## ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА ВАСИЛЬЕВИЧА МЕНШУТКИНА (1930–2023)



26 ноября 2023 года не стало выдающегося ученого, доктора биологических наук, профессора, лауреата Государственной премии Владимира Васильевича Меншуткина, который много лет плодотворно сотрудничал с ИВПС КарНЦ РАН в области создания баз данных по озерам, математического моделирования морских и озерных экосистем, применения инновационных методов в лимнологии и океанологии.

Владимир Васильевич родился 20 июня 1930 года в Иркутске. На Байкале работала его мама – известный ученый-лимнолог, и там же на Байкале в 12 лет он познакомился с директором Байкальской лаборатории, замечательным ученым, большим энтузиастом своего дела Глебом Юрьевичем Верещагиным. В 1955 году Владимир Васильевич окончил Ленинградский кораблестроительный институт и получил специальность инженера-механика. Несколько лет работал в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова в качестве инженера-исследователя, но вскоре ушел из этого института и поступил в аспирантуру Лимнологического института Сибирского отделения Академии наук СССР по специальности «гидрофизика». В 1965 году Владимир Васильевич защитил кандидатскую диссертацию, а в 1974 году – докторскую в области гидробиологии. Вместе с учеными Ф. В. Крогиус и Е. М. Крохиным он создал компьютерную модель популяции промысловой рыбы озера Дальнего (Камчатка), что было важно для определения допустимых норм вылова рыбы красной (нерки) СССР и Японией. Работы В. В. Меншуткина по созданию моделей экосистем озер и популяционных моделей ихтиоценозов были одними из первых в мире. За работу по оз. Дальнему в 1971 году Владимир Васильевич вместе с Ф. В. Крогиус и Е. М. Крохиным был удостоен Государственной премии СССР. В. В. Меншуткин принимал участие в нескольких экспедициях Института океанологии, и по результатам работы им созданы модели динамики популяций рыб и водных беспозвоночных, антарктического криля; экологических систем Японского моря и района Перуанского апвеллинга.

В 1965 году В. В. Меншуткин был приглашен на работу в Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова Академии наук СССР. В этом институте Владимир Васильевич занимался моделированием кровообращения в мозге человека при перегрузках во время взлета космического корабля, разрабатывал модели в области физиологии (кровообращение и водно-солевой обмен). В промежутке между важными исследованиями, в том числе связанными с космической тематикой, он вместе со своим другом и коллегой профессором Л. А. Жаковым с энтузиазмом исследовал биоту озер Херя-ярви и Пуннус-ярви.

В 1980–1986 гг. Владимир Васильевич сотрудничает с ИНОЗ, где создается модель экосистемы Ладожского озера, которое подверглось антропогенному эвтрофированию. В. В. Меншуткин в 1991–1995 гг. был одним из научных руководителей проекта СПбНЦ РАН «Невская губа», в реализацию которого он внес большой личный вклад. Он являлся инициатором создания и разработчиком модели регулирования водопользования экономическими методами. В 1987 году Владимир Васильевич получает звание профессора. В трудное для отечественной науки и ученых России время – с 1996 по 2004 г. – Меншуткин работал по приглашению академика АН Польши Ромуальда Клековского в Международном экологическом центре в Варшаве. Вместе с академиком Клековским созданы модели экосистем водохранилищ, наземных экосистем и написаны несколько книг по математическому моделированию. Существенный вклад внес В. В. Меншуткин в разработку различных моделей в области физиологии. Широкую известность получили его работы по моделированию эволюции. Он создал оригинальную модель эволюции животных (например, гаммарид озера Байкал).

В начале 2000-х годов Владимир Васильевич вернулся в Санкт-Петербург, где стал работать главным научным сотрудником лаборатории моделирования Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. Вместе с коллегами – директором СПб ЭМИ РАН, профессором Л. А. Руховцом и сотрудниками ИНОЗ РАН он продолжил развитие моделей Ладожского озера и Невской губы.

В эти же годы Владимир Васильевич стал тесно сотрудничать с Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН. Нам, сотрудникам института, поистине повезло работать с таким крупным ученым, замечательным человеком, энтузиастом. Владимир Васильевич увлек нас созданием базы данных и знаний об озерах Карелии.

Вместе с ним создана компьютерная база данных и экспертная система «Озера Карелии», которая позволила решать многочисленные лимнологические задачи. Вместе с сотрудниками Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН осуществлялась давняя мечта Г. Г. Винберга и В. В. Меншуткина по созданию экспертной системы для оценки состояния озер и их биологических ресурсов на примере хорошо изученного озерного региона. Совместно с К. В. Показеевым и Н. Н. Филатовым была подготовлена книга «Гидрофизика и экология озер», изданная в МГУ в 2004 г. За работы в области математического и имитационного моделирования (в частности, экологических систем Невской губы и Ладожского озера) в 2006 году Правительством Санкт-Петербурга он был удостоен премии им. А. П. Карпинского в области наук о Земле. В. В. Меншуткин продолжал заниматься одновременно несколькими задачами с использованием разнообразного математического аппарата и доведением исследований до работающих программных продуктов.

В 2018–2022 гг. Владимир Васильевич совместно с сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН и Института экономики КарНЦ РАН создает модели сложной социо-эколого-экономической системы для Белого моря и его водосбора с использованием когнитивного подхода. Математический аппарат, используемый В. В. Меншуткиным в своих работах, очень широк: от систем дифференциальных уравнений до конечных автоматов, нейронных сетей, нечеткой логики и когнитивного моделирования. Работы по моделированию всегда сопровождались обсуждениями, консультациями со специалистами в конкретной области науки и по возможности личным участием в сборе, обработке и анализе экспериментальных данных, которые могут быть использованы в математических моделях. Многие работы Владимира Васильевича использованы для решения практических задач при проектировании защитных сооружений Ленинграда от наводнений, определения допустимых норм вылова красной (нерки) СССР и Японией в морях Тихого океана, оптимального управления экологической системой озер и водохранилищ с целью получения наибольшей экономической выгоды от эксплуатации ресурсов водоема.

В. В. Меншуткин является автором более 310 печатных работ, в том числе 28 книг. Эти книги он посвятил воспоминаниям о лимнологии и лимнологах, размышлениям об эволюции сложных систем. Всего в соавторстве с сотрудниками ИВПС В. В. Меншуткин опубликовал

2 монографии и 22 статьи, из них 4 – в «Трудах Карельского научного центра РАН» в серии «Лимнология» и «Лимнология и океанология».

Нам посчастливилось работать вместе с Владимиром Васильевичем, внедрять и осваивать модели, читать его статьи и книги, в том числе и автобиографические, слушать увлекательные рассказы этого удивительного

человека потрясающей эрудиции, интеллигента с феноменальной памятью, крупного ученого, достойного потомка известных фамилий. Навсегда с нами останутся самые светлые и добрые воспоминания о нем.

*Н. Н. Филатов, коллеги  
из ИВПС КарНЦ РАН*

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации  
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, утраты науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются электронная версия статьи, которую авторы вычитывают и заверяют.

Журнал имеет систему электронной редакции на базе Open Journal System (OJS), позволяющую вести представление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронном формате и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Содержание выпусков Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные версии статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

### ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word в систему электронной редакции на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо высылаются на e-mail: [trudy@krc.karelia.ru](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 наклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо первым словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации.

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (\*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы могут быть снабжены указанием желательного размера рисунка, пожеланиями и требованиями к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Карты 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 желательным 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 желательным указать ее. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Для каждого источника обязательно указание DOI при его наличии; если приводится адрес интернет-страницы источника (URL), нужно указать дату обращения к ней.

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 577.125.8

### **СОДЕРЖАНИЕ МЕТАБОЛИТОВ ОКСИДА АЗОТА В КРОВИ ЗДОРОВЫХ ЛЮДЕЙ И ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗНЫЕ АЛЛЕЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ГЕНОВ ACE (RS4340) И CYP11B2 (RS1799998)**

**Л. В. Топчиева<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 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм <sup>2</sup> 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> 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> 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. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Dulldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

### Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

### References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

### Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // Entomologica Fennica. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

**References:**

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews*. 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

**Литература:**

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

**References:**

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)*. Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

**Литература:**

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

**References:**

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

**Литература:**

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

**References:**

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

**Литература:**

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

**References:**

Grebenshchikov Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

## Ссылки на интернет-ресурсы

### **Литература:**

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

### **References:**

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

**Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences**  
**No. 2, 2024**  
**“LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY” Series**

**TABLE OF CONTENTS**

EDITORIAL .....	5
HYDROPHYSICS. HYDROLOGY	
A. V. Litvinenko. A COMPREHENSIVE ACCOUNT OF THE KARELIAN WATER NETWORK .....	6
S. R. Bogdanov, G. E. Zdorovennova, R. E. Zdorovennov, I. A. Maksimov, N. I. Palshin. FEATURES OF MIXING THE WATER MASS OF A SMALL LAKE DURING NIGHT COOLING .....	25
HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS	
E. N. Unkovskaya, M. V. Kosova, N. V. Shurmina, F. M. Mukhametzyanova, Yu. A. Ignatiev. HYDRO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TYPES OF LAKES IN THE VOLZHSKO-KAMSKY RESERVE .....	39
HYDROBIOLOGY	
A. G. Rusanov, T. Yu. Gazizova, A. E. Lapenkov, T. V. Sapelko. CURRENT STATE OF VEGETATION COVER OF LAKES BELOE AND LIPOVSKOE (KURGALSKY PENINSULA) .....	51
RESEARCH METHODS	
V. V. Guzivaty, M. A. Naumenko. APPLICATION OF THE MAXIMUM CROSS-CORRELATION METHOD FOR ESTIMATION OF SURFACE CURRENTS OF LARGE INLAND WATER AREAS .....	65
K. A. Podgornyi, O. A. Dmitrieva, A. S. Semenova. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF DIRECT SEARCH ALGORITHMS FOR ESTIMATING VALUES OF PARAMETERS IN ECOSYSTEMS MODELS FOR THE NEVA BAY AND VISTULA LAGOON OF THE BALTIC SEA .....	79
A. Yu. Briukhanov, S. A. Kondratyev, N. N. Filatov, E. V. Vasilev, N. S. Oblomkova. METHODOLOGY FOR COLLECTING INITIAL DATA TO ASSESS DIFFUSE AGRICULTURAL POLLUTION OF WATER BODIES (THE CASE OF THE LAKE ONEGO CATCHMENT) .....	95
HISTORY OF SCIENCE	
O. T. Rusinek, E. A. Mamontova. TO THE ANNIVERSARY OF BAIKAL RESEARCHER E. N. TARASOVA (1938–2017) .....	108
CHRONICLE	
S. A. Kondrat'ev. All-Russian scientific conference 'Limnology in Russia', dedicated to the 80th anniversary of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, February 12–14, 2024) .....	117
BEREAVEMENTS	
In memory of Vladimir V. Menshutkin (1930–2023) .....	125
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS .....	128

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра  
Российской академии наук**  
№ 2, 2024

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 22.03.2024. Дата выхода 29.03.2024. Формат 60x84<sup>1/8</sup>.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 14,8. Усл. печ. л. 15,6.  
Тираж 100 экз. Заказ 803. 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