

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр
Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 6, 2023

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2023

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

Издается с января 2009 г.

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

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

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

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

No. 6, 2023

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY

Petrozavodsk
2023

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, PhD (Chem.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); N. V. IL'MAST, DSc (Biol.); A. V. ISAEV, PhD (Geog.); S. F. KOMULAINEN, DSc (Biol.); S. A. KONDRAT'EV, DSc (Phys.-Math.); A. V. KURAEV, PhD (Geog.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.); L. E. NAZAROVA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Geog.); I. Sh. NORMATOV, DSc (Chem.), Prof.; L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. I. SIDOROVA, PhD (Biol.); A. V. ZIMIN, DSc (Geog.).

Published since January 2009

8 issues a year

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

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

E-mail: trudy@krc.karelia.ru

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

© Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2023

© Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences, 2023

УДК 556.555

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАБОРАТОРИИ ГИДРОФИЗИКИ ИВПС КарНЦ РАН В 1991–2022 ГОДАХ

А. Ю. Тержевик, Н. И. Пальшин, Т. В. Ефремова, С. Р. Богданов,
С. Д. Голосов, И. С. Зверев, С. Ю. Волков, А. В. Митрохов,
С. И. Смирнов, Р. Э. Здоровеннов, Г. Э. Здоровеннова*

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

Представлены сведения о направлениях и результатах исследований лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН за 1991–2022 гг. Сотрудники лаборатории изучают гидрофизические процессы и явления в разнотипных водоемах Карелии, в крупнейших водоемах Евразии – Онежском и Ладожском озерах, озере Байкал, в Белом море, а также в малых озерах Арктической зоны России. Приведены краткие сведения о практических разработках и фундаментальных научных результатах, достигнутых при выполнении государственного задания, международных и российских научных проектов, в том числе выполненных совместно с отечественными и зарубежными научными и образовательными организациями. К основным результатам можно отнести выявление закономерностей формирования термического, динамического, ледового, радиационного и кислородного режимов озер в годовом цикле (с наибольшим вниманием к периоду ледостава), разработку термической модели Онежского озера, разработку и внедрение, совместно с коллегами из Института озероведения РАН, Немецкой службы погоды и Института пресноводной экологии и рыбоводства внутренних вод (IGB, Германия), озерной модели FLake, разработку 3D-модели Вендюрского озера, изучение переноса энергии и парниковых газов в озерных экосистемах высоких широт совместно с коллегами из Хельсинкского университета, оценку адаптационных свойств водных экосистем Арктики в условиях меняющегося климата совместно с коллегами из СПбГУ (озера п-ова Ямал, дельты р. Лены, Кольского п-ова), изучение параметров турбулентности в покрытых льдом озерах в период весенней подледной конвекции, численное моделирование (Implicit LES) радиационно-генерированной конвекции совместно с коллегами из Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, исследование гидрофизических процессов и явлений в заливах и бухтах Белого моря совместно с коллегами из ИВП РАН (Москва) и РГГМУ (СПб), изучение турбулентного переноса, определяющего условия роста и таяния льда в пограничном подледном слое озера Байкал совместно с коллегами из Университета Тулузы (Франция) и Лимнологического института (Иркутск).

Ключевые слова: ИВПС КарНЦ РАН; бореальные озера; термический и ледовый режимы; кислородный режим; гидродинамика; турбулентность; Белое море; Онежское озеро; численное моделирование; FLake; арктические лимносистемы

Для цитирования: Терзhevik А. Ю., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Богданов С. Р., Голосов С. Д., Зверев И. С., Волков С. Ю., Митрохов А. В., Смирнов С. И., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Исследования лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН в 1991–2022 годах // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 5–22. doi: 10.17076/lim1809

A. Yu. Terzhevik, N. I. Palshin, T. V. Efremova, S. R. Bogdanov, S. D. Golosov, I. S. Zverev, S. Yu. Volkov, A. V. Mitrokhov, S. I. Smirnov, R. E. Zdorovennov, G. E. Zdorovennova*. RESEARCH BY HYDROPHYSICS LABORATORY OF NWPI KarRC RAS IN 1991–2022

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

Information is presented on the directions and results of research at the Hydrophysics Laboratory of the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences in 1991–2022. Laboratory staff study hydrophysical processes and phenomena in various lakes of Karelia, in the largest lakes of Eurasia – Onego and Ladoga, in Lake Baikal, in the White Sea, as well as in small lakes of the Arctic zone of Russia. Brief information is provided on the applied developments and basic scientific results produced while implementing state-ordered assignments, international and domestic research projects, including those carried out jointly with Russian and foreign scientific and educational organizations. The main results include: identification of patterns in the formation of the thermal, hydrodynamic, ice, radiation and oxygen regimes of lakes through the annual cycle (with more focus on the ice-covered period); development of a thermal model of Lake Onego; development and implementation of FLake lake model in collaboration with colleagues from the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, German Weather Service, and the Institute for Freshwater Ecology and Inland Fisheries (IGB, Germany); development of a 3D model of Lake Vendyurskoe; investigation of energy and greenhouse gas transport in high-latitude lake ecosystems in collaboration with colleagues from the University of Helsinki; assessment of the adaptive properties of Arctic aquatic ecosystems (lakes of the Yamal Peninsula, deltas of the Lena River, Kola Peninsula) in a changing climate in collaboration with colleagues from the St. Petersburg State University; study of turbulence parameters in ice-covered lakes during the period of spring under-ice convection, numerical modeling (Implicit LES) of radiation-generated convection in collaboration with colleagues from the Physical-Mechanical Institute of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; study of hydrophysical processes and phenomena in bays and inlets of the White Sea in collaboration with colleagues from the Water Problems Institute RAS (Moscow) and the Russian State Humanitarian University (St. Petersburg); study of turbulent transport, which determines the conditions for ice build-up and melting in the subglacial boundary layer of Lake Baikal in collaboration with colleagues from the University of Toulouse, France, and the Limnological Institute in Irkutsk.

Keywords: NWPI KarRC RAS; boreal lakes; thermal and ice regimes; oxygen regime; hydrodynamics; turbulence; White Sea; Lake Onego; numerical modeling; FLake; Arctic limnic systems

For citation: Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Bogdanov S. R., Golosov S. D., Zverev I. S., Volkov S. Yu., Mitrokhov A. V., Smirnov S. I., Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E. Research by Hydrophysics Laboratory of NWPI KarRC RAS in 1991–2022. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 5–22. doi: 10.17076/lim1809

Введение

Для того чтобы охарактеризовать деятельность лаборатории гидрофизики Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС) за последние тридцать лет,

необходимо сказать несколько слов о специфике этого периода. Десятилетие с 1991 по 2000 г. было наиболее тяжелым и для Карельского научного центра, и в целом для российской науки: отсутствие устойчивого государственного финансирования научных исследований и ощущения

перспективы, низкие доходы сотрудников привели к уходу из многих институтов наиболее активных и квалифицированных специалистов. В результате большинство научных учреждений страны перешли в состояние «анабиоза». Небольшое число институтов, в их числе ИВПС, использовали любую возможность сохранить рабочее состояние коллектива. Хоздоговорные работы и двусторонние международные соглашения были в то время основными рабочими инструментами. Все гидрофизические исследования ИВПС до образования лаборатории гидрофизики в 2002 г. проводились лабораторией гидрологии, заведующим которой в 1988–1999 гг. был П. М. Бояринов (рис. 1).

Особое внимание на протяжении многих лет исследований уделялось термическому и гидродинамическому режимам Онежского озера. На основе анализа данных наблюдений было установлено [Бояринов, Петров, 1991], что большое влияние на динамику вод озера оказывают сезонные фронтальные зоны: в период весеннего нагревания и осеннего охлаждения – термический бар, при установившейся термической стратификации летом – апвеллинги, в устьях рек – стоковые фронты. Впервые рассмотрена роль свободной проникающей конвекции в перемешивании водных масс в период весеннего подледного прогрева и в суточном цикле теплообмена в системе «озеро–атмосфера». Детальные исследования

баротропных сейш и внутренних волн [Бояринов, Петров, 1991] показали их роль в пространственно-временной изменчивости полей температуры в озере. Для расчетов плотности пресной воды как двухкомпонентной системы (вода – растворенные соли с постоянным соотношением главных ионов) были предложены дополнительные поправки, позволяющие учитывать химический состав воды [Пальшин, 1999].

К началу 1994 года между ИВПС и Департаментом инженерии водных ресурсов Лундского университета (Швеция) была достигнута договоренность о проведении пилотного проекта исследований гидрофизических процессов в подледный период в небольшом озере Вендюрское, расположенном на юге Карелии. Вкладом с российской стороны являлись опыт сотрудников в проведении подобных работ и приборная база, превосходившая технические возможности наших шведских коллег. Рабочие моменты тех лет показаны на рис. 2. Работы проводились 18 марта – 7 апреля 1994 г. на оз. Вендюрском на шести разрезах (рис. 3, а). Помимо площадных съемок были установлены две термокосы; также проводились измерения течений на отдельных станциях и горизонтах в столбе воды. Подробное описание работ, использовавшейся аппаратуры и полученные результаты приведены в [Bengtsson et al., 1996; Malm et al., 1996, 1998]. Эти исследования положили начало углубленному изучению

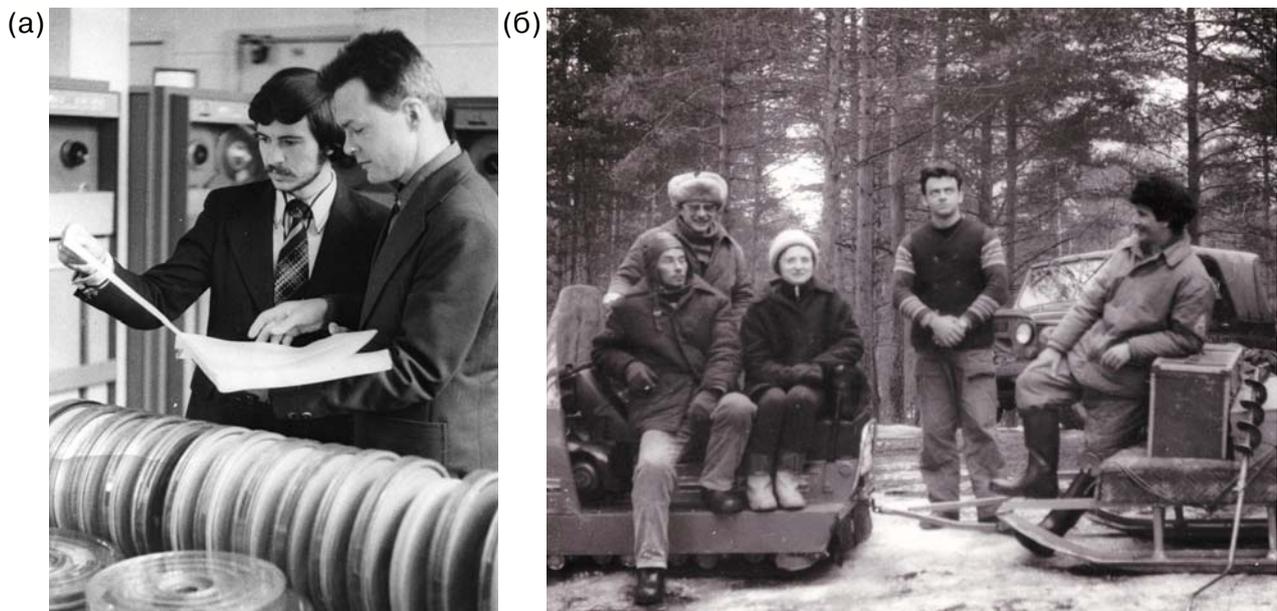


Рис. 1. (а) П. М. Бояринов (слева) и П. Т. Хайми в лаборатории вычислительной техники; (б) слева направо: Б. М. Зобков, М. П. Петров, Т. В. Ефремова, С. Ф. Руднев, П. М. Бояринов на оз. Сямозеро, март 1986 г.

Fig. 1. Left photo: P. M. Boyarinov (left) and P. T. Hymie in the computer lab. Right photo: from left to right B. M. Zobkov, M. P. Petrov, T. V. Efremova, S. F. Rudnev, P. M. Boyarinov on Lake Syamozero, March, 1986

подледного периода на малых озерах, которое продолжается по сегодняшний день.

Следует сразу отметить, что с самого начала принципиальным отличием наших работ на оз. Вендюрском от всех известных на тот момент лимнологических исследований малых озер были систематические наблюдения на большой сетке станций с регистрацией всех параметров, необходимых для различных оценок, и в первую очередь – потоков тепла на границах сред [Mironov et al., 2002; Голосов и др., 2017].

С 1994 по 2006 год основное внимание уделялось периоду ледостава: ежегодно с октября по май в озере находились 1–3 автономные косы, фиксирующие температуру с шагом по времени 1–3 ч датчиками, распределенными по водному столбу через 0,5–1,5 м [Петров и др., 2006].

В течение четырех зимних сезонов в озере устанавливалась так называемая «тройная» коса, включающая дополнительные датчики во льду и в верхнем слое донных отложений (до глубины 1,4 м). В 1994–1996 годах выполнялось



Рис. 2. (а) Полевые работы в марте-апреле 1994 г. на озере Вендюрском. Слева направо: А. Ю. Тержевик, А. В. Митрохов, П. М. Бояринов, Й. Мальм; (б) рабочее совещание в рамках совместного проекта с Лундским университетом на НИС «Эколог», Онежское озеро. Слева направо: А. М. Глинский, М. П. Петров, Л. Йонссон, Й. Мальм, А. Ю. Тержевик

Fig. 2. Upper photo: field work in March-April, 1994 on Lake Vendyurskoe, from left to right A. Yu. Terzhevik, A. V. Mitrokhov, P. M. Boyarinov, J. Malm. Lower photo: working meeting within the framework of a joint project with Lund University on the R/V 'Ecolog', Lake Onego, from left to right A. M. Glinsky, M. P. Petrov, L. Jonsson, J. Malm, A. Yu. Terzhevik

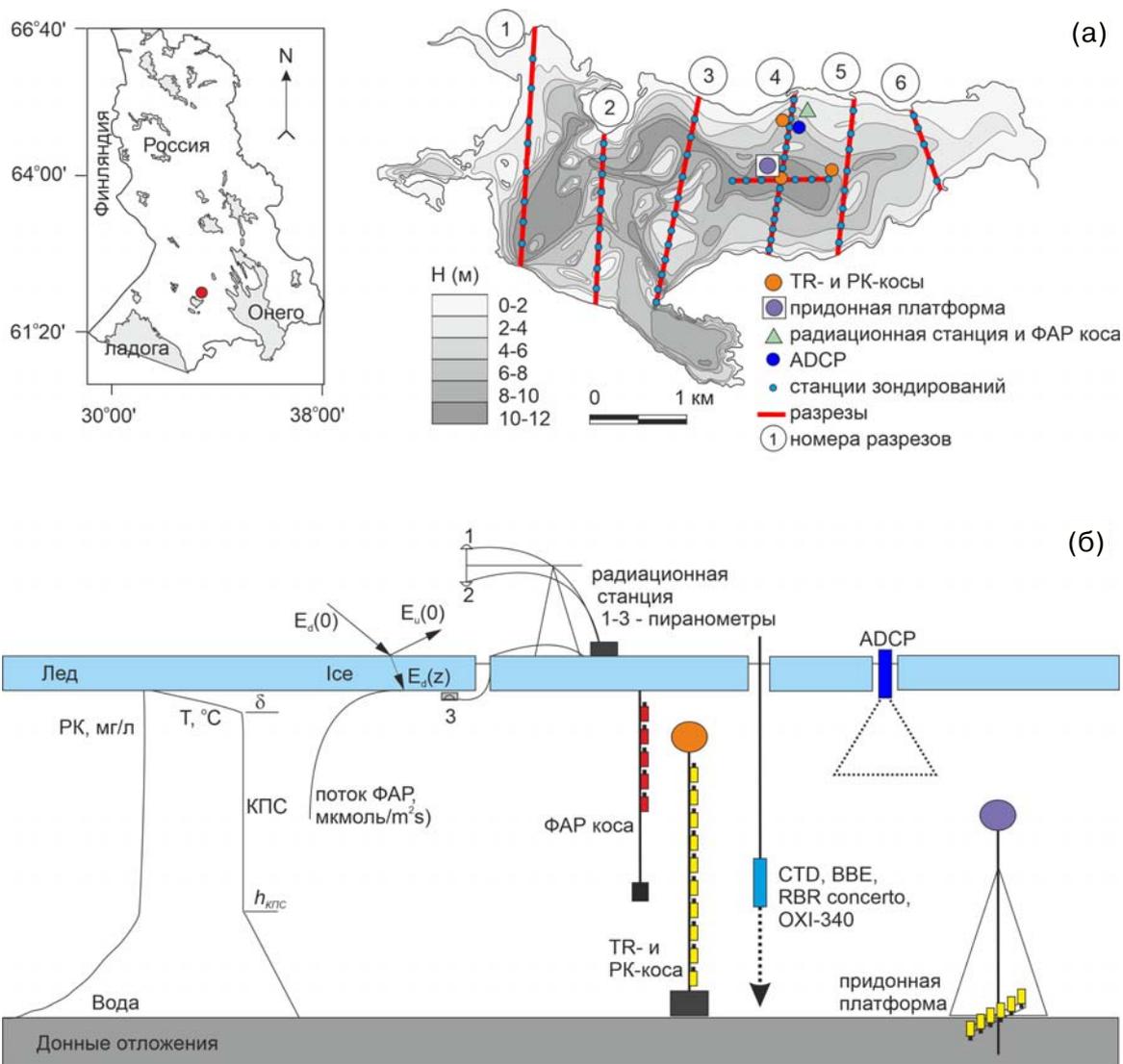


Рис. 3. (а) Положение оз. Вендюрское на карте Карелии (красная точка), батиметрия озера, положение разрезов и станций измерений; (б) схема расположения приборов в воде и на льду, схематичное распределение по вертикали температуры, растворенного кислорода и потоков ФАР в период весенней подледной конвекции

Fig. 3. (a) Location of Lake Vendyurskoe on the map of Karelia (red dot), bathymetry of the lake, location of transects and measurement stations, (b) schematic layout of devices in water and on ice, and a schematic vertical distribution of temperature, dissolved oxygen and PAR fluxes during the period of spring under-ice convection

3–4 сезонных зимних съемки на 55 станциях 6 поперечных разрезов (рис. 3, а), в последующие годы количество разрезов сократилось до двух – продольного и поперечного, а количество станций до 22.

На разрезах проводились измерения: температуры и электропроводности воды от уреза воды до дна, а также вблизи границ вода-лед и вода-дно; содержания растворенного кислорода (РК) (с 2000 г.); температурного градиента в верхнем 10-см слое донных отложений (ДО); толщины и структуры снежно-ледового покро-

ва и уровня воды в лунке; суммарной, отраженной, а также проникающей под лед солнечной радиации (на радиационной станции); течений, а также горизонтальных и вертикальных смещений льда.

Для измерения температуры на автономных буйковых станциях использовались термоксы TR-1, при вертикальных зондированиях – RCM-4 (оба прибора производства норвежской фирмы Aanderaa Instruments) и TCD-зонд, разработанный в ИВПС КарНЦ РАН. Поскольку накопители данных были ограниченной

емкости, сигнал регистрировался с шагом 1–3 часа. Для измерения течений применялись высокочувствительные приборы: акустический измеритель течений АСМ, разработанный НПО «Экран», и волосковый измеритель течений DWCM, разработанный в ИВПС КарНЦ РАН А. М. Глинским [Glinsky, 1998]. Измерения прямой, отраженной и подледной радиации проводились с помощью пиранометров «Star-shaped pyranometer» фирмы «Theodor Friderich & Co, Meteorologische Geräte und Systeme» (рис. 4, а), а также прибора, сконструированного на базе универсального отечественного пиранометра М-80М. Оценки альbedo снежно-ледового покрова выполнялись с использованием универсального пиранометра М-80М и цифрового милливольтметра. Определение концентраций РК (с 2000 г.) производилось с использованием прибора Oxi340 WTW (Германия) (рис. 4, б).

С 2007 г. приборный парк ИВПС начал наполняться современным оборудованием, что существенно расширило диапазон измерений и список исследуемых процессов. От наблюдений за изменениями в пределах сезона (зима, весна) мы смогли перейти к круглогодичным исследованиям, появилась возможность изучения годовой и межгодовой динамики наблюдаемых параметров, а также, за счет высокой точности приборов, мезо- и мелкомасштабных процессов.

В центральной глубоководной части оз. Вендюрского (рис. 3, а) с июля 2007 г. до настоящего времени (за исключением периода с октября 2013 г. по октябрь 2014 г.) в круглогодичном режиме находится коса, оснащенная высокоточными датчиками температуры, растворенного кислорода и давления RBR Ltd. (точность по температуре 0,001 °С, диапазон по кислороду 0–150 %, точность 1 %, диапазон по давлению 0–20, 0–50, 0–200 м). В 2007–2013 гг. дополнительно устанавливались еще две косы с такими же датчиками – над локальным углублением вблизи северного берега озера и на восточном склоне (рис. 3, а). Датчики на косах распределены по водному столбу через 0,02–1,5 м с наибольшей дискретностью в придонном слое. В июне и октябре автономная станция извлекается из озера для замены батарей, калибровки датчиков и снятия данных, затем возвращается в озеро. Интервал измерений – одна минута.

На расстоянии ~ 50 м от центральной косы в 2007–2020 гг. устанавливалась придонная платформа, оснащенная 10 датчиками температуры и давления RBR, распределенными таким образом, что часть из них попадают в верхний слой донных отложений, часть – оста-

ются в придонной воде. Сдвиг между датчиками составляет 2 см, что позволяет с высокой точностью вычислять величину теплопотока на границе вода-дно и изучать его изменение в годовом цикле. Конструкция придонной платформы за годы измерений несколько раз менялась [Гавриленко и др., 2015]. За основу первого варианта была принята придонная платформа, разработанная в IGB (Германия) при активном участии Г. Б. Кириллина [Kirillin et al., 2009]. В настоящее время используется модель платформы, фото которой приведены на рис. 5. На эту модификацию придонной платформы получено свидетельство о государственной регистрации полезной модели, авторы – А. В. Митрохов и Н. И. Пальшин [2015].

Начиная с октября 2007 г. до настоящего времени на озере ежегодно проводятся сезонные съемки в апреле (период весеннего таяния и развития подледной конвекции), июне (весенне-летнее нагревание, установление стратификации) и октябре (осеннее охлаждение, гомотермия). Измерения проводятся на 22 станциях продольного и поперечного разрезов (рис. 3, а) в режиме вертикального зондирования водной толщи зондами CTD-48, CTD-90, RBR-Concerto, VBE Moldaenke. Измеряемые параметры – температура воды, электропроводность, мутность, РК, хлорофилл *a*, поток фотосинтетической радиации (ФАР). С весны 2007 г. при проведении сезонных съемок в озеро устанавливается коса, оснащенная датчиками ФАР, распределенными до глубин 2,5–7,0 м.

С июня 2015 г. в распоряжении лаборатории появились два высокоточных прибора – акустические доплеровские измерители течений Aquadopp Nortek Profiler HR, с помощью которых проводится изучение параметров турбулентности конвективного слоя покрытых льдом озер. Начиная с 2021 г. в рамках выполнения проекта РНФ 21-17-00262 «Перемешивание в бореальных озерах: механизмы и их эффективность» совместно с сотрудниками Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого проводится численный расчет параметров турбулентности конвективно-перемешанного слоя покрытого льдом озера в период развития весенней подледной конвекции.

Наряду с ежегодными исследованиями на оз. Вендюрском сотрудники лаборатории гидрофизики совместно с коллегами из других лабораторий ИВПС КарНЦ РАН принимают активное участие в исследованиях и других водоемов. С использованием обширного парка современного оборудования измерения про-

водятся на разнотипных водоемах Карелии, на Онежском и Ладожском озерах (рис. 6), озере Байкал совместно с коллегами из Университета Тулузы (Франция) и Лимнологического института (Иркутск), на Белом море – с ИВП РАН (Москва) и РГГМУ (СПб), ряде водоемов Арктической зоны – в дельте р. Лены, п-ове Ямал, Кольском п-ове совместно с коллегами из СПбГУ, АНИИ, Казанского и Сибирского федеральных университетов.

Основные результаты исследований лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН за прошедшие 30 лет

Термический, ледовый и кислородный режимы озер

Анализ данных многолетних измерений температуры и течений в период ледостава в оз. Вендюрском позволил установить, что в



Рис. 4. (а) Измерение потоков радиации на поверхности Онежского озера; (б) измерение содержания растворенного кислорода в надилловой воде Н. И. Пальшиным, оз. Вендюрское

Fig. 4. (a) Measurements of solar radiation fluxes on the surface of Onego Lake; (б) measuring dissolved oxygen content in the above silt water by N. I. Palshin, Lake Vendyurskoe

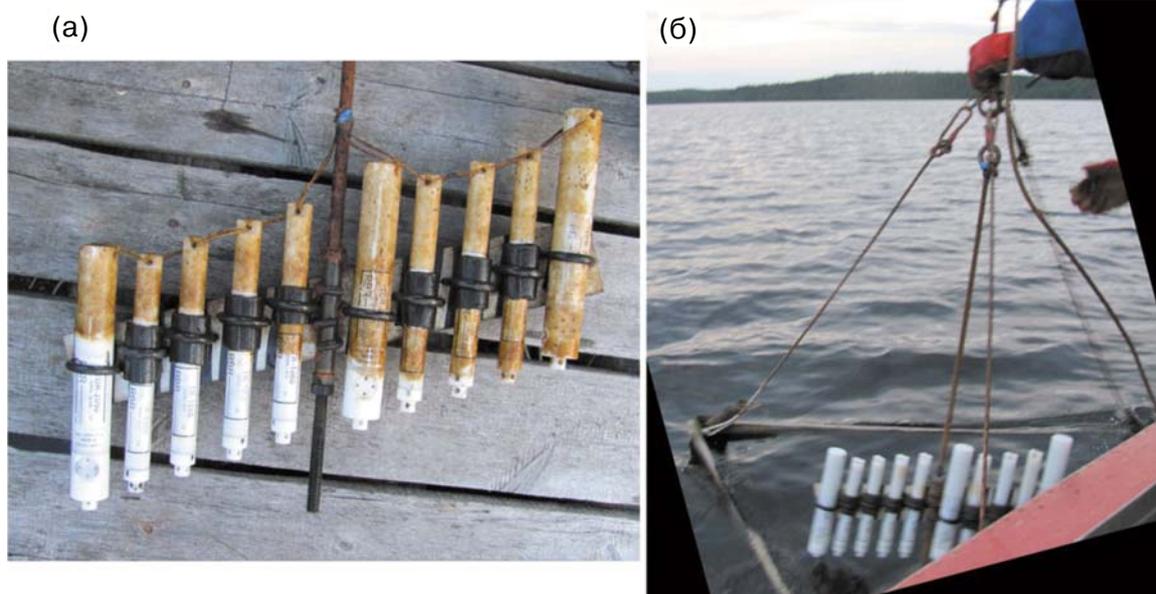


Рис. 5. Придонная платформа: (а) после извлечения из озера 15 июня 2016 г.; (б) постановка в озеро 17 июня 2016 г.

Fig. 5. Bottom platform: (a) after being removed from the lake on June 15, 2016, (б) placing in the lake on June 17, 2016

озере зимой практически постоянно наблюдаются квазипериодические колебания температуры воды и скорости, по времени близкие к теоретическому периоду баротропной сейши [Петров и др., 2007; Здоровеннов и др., 2011]. Исследования показали, что эти колебания могут выступать в роли резонатора для формирования коротких внутренних волн [Palshin et al., 2018; Volkov et al., 2020; Bogdanov et al., 2023b].

В мелководных озерах зимой динамика РК определяется биохимическими процессами [Golosoov et al., 2007; Тержевик и др., 2010; Zdorovenнова et al., 2021]. Отсутствие света и активность бактерий в придонных слоях приводят к резкому снижению в них РК, вплоть до аноксии. Установлено, что поздний ледостав приводит к существенным потерям тепла в озере и донных отложениях и более длительной аэрации водоема. В результате вода в придонных слоях после установления льда прогревается слабее и вероятность образования аноксии уменьшается из-за снижения активности бактерий, потребляющих кислород при разложении органики [Terzhevik et al., 2009; Тержевик и др., 2010]. Летом при усилении стратификации создаются благоприятные условия для формирования острого кислородного дефицита в придонных слоях [Ефремова и др., 2015; Тержевик и др., 2017]. Результаты моделирования показывают, что потепление климата увеличивает риск возникновения глубоководной анок-

сии в мелких мезотрофных водоемах, расположенных в зоне умеренных широт [Golosoov et al., 2012].

По данным инструментальных наблюдений на сети станций и постов Северо-Западного межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета за многолетний период (1936–1989 гг.) выявлены особенности термического и ледового режимов более 70 разнотипных озер Карелии. Получены регрессионные уравнения, позволяющие вычислять температуру поверхности озер в период открытой воды, сроки «биологического лета», вертикальное распределение температуры воды в период максимального прогрева летом и в период ледостава, а также сроки ледовых явлений для различных типов водоемов в зависимости от географических факторов [Озера..., 2013; Ефремова и др., 2016; Пальшин, Ефремова, 2017]. Анализ ледовой фенологии в 1950–2009 гг. показал смещение сроков замерзания озер к более поздним, а сроков очищения ото льда – к более ранним датам по сравнению со среднемноголетними значениями. Продолжительность периода ледостава на озерах сократилась в среднем на 11–16 суток, а для Онежского озера и Сегозера – более чем на 20 суток по сравнению со средними значениями за весь 60-летний период [Efremova et al., 2013].



Рис. 6. Измерение гидрофизических параметров с борта НИС «Эколог». Слева направо: Р. Э. Здоровеннов, А. В. Митрохов

Fig. 6. Measuring hydrophysical parameters from the R/V 'Ecolog'. From left to right: R. E. Zdrovennov, A. V. Mitrokhov

Радиационный режим озер

На основе анализа данных многолетних актинометрических наблюдений показана значительная временная (межгодовая, сезонная, синоптическая, суточная) и пространственная изменчивость альbedo снежно-ледяного покрова оз. Вендюрского. Установлены диапазоны альbedo снега и льда для широкого спектра состояния поверхности и погодных условий [Петров и др., 2005]. Разработан метод параметризации альbedo поверхности озера в период весеннего таяния, основанный на использовании в качестве предиктора аккумулированного внешнего потока тепла, определяющего скорость таяния снега, белого и кристаллического льда и, следовательно, изменчивость альbedo во времени [Zdrovennova et al., 2018]. В результате серии натурных экспериментов определены эффективные коэффициенты поглощения солнечной радиации снегом и льдом. Сравнение наблюдаемых и расчетных значений подледной радиации показало, что найденные коэффициенты адекватно описывают поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом [Петров и др., 2005].

Процессы переноса и перемешивания в озерах

По результатам многолетних натурных измерений исследовано влияние гидрофизиче-

ских факторов на распределение клеток водорослей по водному столбу в период открытой воды [Здоровеннов и др., 2021] и ледостава [Пальшин и др., 2019]. Для периода открытой воды показано, что, когда водная толща озера находится в состоянии гомотермии, хлорофилл *a* равномерно распределен по водному столбу. При усилении термической стратификации максимальные концентрации хлорофилла *a* приурочены к поверхностному перемешанному слою, ниже слоя скачка температуры они резко снижаются. Для периода весенней подледной конвекции получено прогностическое уравнение, отражающее обратную зависимость коэффициентов вариации концентрации хлорофилла *a* в конвективном слое от потоков солнечной радиации, проникающей под лед; показана связь между увеличением концентрации хлорофилла в конвективном слое и толщиной слоя [Пальшин и др., 2019].

По данным многолетних измерений изучены процессы переноса и перемешивания при развитии весенней подледной радиационно-генерированной конвекции в покрытых льдом озерах [Mironov et al., 2002; Kirillin, Terzhevik, 2011; Kirillin et al., 2012; Zdrovennova et al., 2021; Bogdanov et al., 2023a]. В рамках международного междисциплинарного проекта «Life under ice» (2015–2017 гг.), направленного на изучение функционирования биоты озер в период ледостава в меняющихся климатических усло-

виях, проведены уникальные эксперименты по одновременному измерению температуры и электропроводности воды, потоков солнечной радиации в водной толще, течений, концентраций хлорофилла *a* и РК [Bouffard et al., 2019]. Получены новые представления о пространственной структуре конвективного слоя как о системе упорядоченных конвективных ячеек, оценены их размеры и скорость перемещения. Установлено, что, несмотря на низкие скорости течений, гидродинамический режим конвективного слоя близок к режиму полностью развитой турбулентности [Volkov et al., 2018; Bogdanov et al., 2019; Волков и др., 2019].

В рамках проекта РНФ 21-17-00262 «Перемешивание в бореальных озерах: механизмы и их эффективность», поддержанного в 2021 г., разработаны методы расчета турбулентных напряжений, основанные на использовании данных одного или двух трехлучевых акустических доплеровских профилографов скорости. Эти методы позволяют рассчитывать не только интенсивности пульсаций вдоль трех ортогональных осей, но и недиагональные компоненты тензора Рейнольдса. С использованием условия однородности средней скорости по горизонтали рассчитана анизотропия турбулентных пульсаций, изучена корреляция энергии турбулентности с интенсивностью накачки (через поток плавучести). Приведен качественный анализ параметров и динамики энергосодержащих структур, развивающихся в конвективном слое небольших покрытых льдом озер весной [Bogdanov et al., 2021a, b].

Термическая модель Онежского озера

С использованием данных измерений температуры воды на рейдовых вертикалях Онежского озера Карельского республиканского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за период с 1958 по 1989 г. и натурных данных ИВПС были получены среднемноголетние характеристики распределения температуры воды. Для вычисления среднемноголетнего хода температуры воды на различных горизонтах использовалась непрерывная временная аппроксимирующая параметрическая функция, которая позволяет получать ежедневные средние значения температуры воды на стандартных горизонтах в различных районах Онежского озера [Бояринов и др., 1999]. По полученным модельным кривым построены ежемесячные карты-схемы распределения температуры воды с 1 июня по 1 ноября на различных горизонтах, распределение температуры воды на вертикальных разрезах [Онежское..., 2010]. Впервые

были установлены среднемноголетние пространственные распределения полей температуры воды в Онежском озере на любую дату для периода открытой воды. Они позволили выявить характерные особенности в формировании температурного режима в различных районах озера на разных горизонтах, количественно оценить интенсивность нагрева и охлаждения отдельных слоев, определить сроки максимального прогревания различных горизонтов, время прохождения термического бара, сроки наступления «биологического лета».

Численное моделирование термогидродинамических процессов в мелководном озере

Коллективом исследователей, в который входили сотрудники лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН, Института озероведения РАН, Немецкой службы погоды и Института пресноводной экологии и рыбоводства внутренних вод (IGB, Германия), разработана и внедрена в широкое пользование новая озерная модель FLake [Mironov et al., 2010; Kirillin et al., 2011; Golosov et al., 2018]. Эта модель была включена для тестирования в систему численного прогноза погоды для ограниченной территории Немецкой службы погоды, а также в коды региональных климатических моделей CLM (GKSS Research Center, Geesthaht, Германия) и RCA (SMHI, Norrköping, Швеция). На сегодняшний день модель используется в качестве озерного модуля практически во всех европейских консорциумах численного прогноза погоды, включая Россию, и широко применяется в исследованиях озер на региональном и глобальном уровне [Woolway, Merchant, 2019].

Трехмерная математическая модель гидротермодинамики внутреннего моря (МГВМ), разработанная в Институте вычислительной математики РАН и в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Ибраев, 2008], адаптирована для пресноводных озер. Для оз. Вендюрского построена сеточная область по данным подробной эхолокационной съемки. Модель верифицирована по данным измерений температуры на оз. Вендюрском в зимний период. Проведен расчет термогидродинамических полей в озере в период открытой воды при меняющемся атмосферном воздействии [Зверев и др., 2020].

Численный расчет подледной радиационно-генерированной конвекции проведен в рамках проекта РНФ 21-17-00262, для расчетов использовался конечно-объемный программный код SINF/Flag-S, разработанный в СПбПУ [Смирнов, Зайцев, 2004]. В работе применялся

алгоритм SIMPLEC со вторым порядком точности по времени. Дискретизация конвективных слагаемых выполнена с использованием схемы QUICK (номинально третьего порядка точности). Диффузионные слагаемые аппроксимировались по центрально-разностной схеме второго порядка точности. В расчетах использовался метод Implicit LES (ILES), в котором не вводится подсеточная турбулентная вязкость, а роль физической вязкости на подсеточных масштабах заменяется диссипативными свойствами соответствующей численной схемы. Модельные поля температуры и скорости при периодической внешней накачке энергии хорошо воспроизводят особенности изменения этих параметров в покрытых льдом озерах в период весеннего подледного нагревания [Smirnov et al., 2022; Bogdanov et al., 2023a].

Участие в исследованиях Белого моря

Сотрудники лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН принимали активное участие в многолетних экспедиционных исследованиях, направленных на изучение гидрофизических процессов в заливах и бухтах Белого моря, а также в эстуарных зонах впадающих в море рек, совместно с коллегами из других лабораторий ИВПС, а также с учеными ИВП РАН (Москва) и РГГМУ (СПб). Результаты этих исследований отражены в ряде публикаций в ведущих отечественных и зарубежных изданиях [White..., 2005; Долотов и др., 2005, 2008; Белое..., 2007; Радченко и др., 2019].

Участие в исследованиях на озере Байкал

Сотрудники лаборатории гидрофизики ИВПС принимали участие в исследованиях гидрофизических процессов в озере Байкал в период ледостава. В рамках совместных экспедиционных работ с коллегами из Франции (Университет Тулузы), IGB (Германия, Берлин) и Лимнологического института (Россия, Иркутск) исследовался интереснейший феномен появления колец на льду больших озер [Kougaev et al., 2019], проводилось изучение турбулентного переноса, определяющего условия роста и таяния льда в пограничном подледном слое [Kirillin et al., 2020].

Участие в экспедиционных исследованиях водоемов Арктической зоны

Сотрудники лаборатории гидрофизики ИВПС, совместно с учеными из СПбГУ, ААНИИ, Казанского и Сибирского федеральных университетов, в рамках проектов РФФИ «Эмерджентность

прибрежных арктических водных экосистем как результат изменения палеоэкологических и современных воздействий» (2014–2016 гг.) и РФФИ_Арктика «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата» (2018–2020 гг., рук. И. В. Федорова, СПбГУ) проводили экспедиционные исследования, направленные на оценку состояния и изменений водных экосистем Арктики, их адаптационных свойств в условиях меняющегося климата. Исследования проводились на озерах п-ова Ямал, дельты р. Лены, Кольского п-ова. В рамках проекта проводился анализ многолетних данных о параметрах меняющейся окружающей среды, разрабатывались новые индикаторы для оценки изменения водных экосистем, обосновывался прогноз их дальнейшего развития [Здоровеннова и др., 2016; Zdorovenov et al., 2020; Fedorova et al., 2021; Weyhenmeyer et al., 2022].

Международное сотрудничество

В течение многих лет происходило международное сотрудничество лаборатории гидрофизики с Лундским университетом (Швеция), Университетом Хельсинки (Финляндия), Немецкой службой погоды (Германия), Лейбниц-Институтом пресноводной экологии и внутреннего рыболовства (Германия). Выполнен ряд проектов, поддержанных Европейской комиссией, ИНТАС, РФФИ и другими научными фондами. Вот некоторые из этих проектов: «The Thermal Structure and Circulation Patterns in Ice-Covered Lakes: Measurements and Modelling» (INTAS-97-0734, 1998–2000); «Representation of Lakes in Numerical Models for Environmental Applications» (INTAS-01-2132, 2002–2004); «Lake model FLake: An advanced tool for environmental modeling and education» (INTAS-05-100007-431, 2004–2006); «Тепло- и массоперенос в озерах подо льдом» (РФФИ № 10-05-91331-ННИО_а, 2010–2012); «Цикл углерода в системе озеро-атмосфера: наблюдения и моделирование / Роль физических процессов в динамике метана в мелководных бореальных озерах» (РФФИ, № 14-05-91761-АФ_а, 2014–2016), «Towards a comprehensive understanding of transport of energy and greenhouse gases in lacustrine ecosystems (GHG-LAKE)» (7-я рамочная программа, международная схема по обмену исследователями, номер гранта PIRSES-GA-2013-612642, 2015–2018).

Востребованность результатов

В базе данных РИНЦ зарегистрировано 290 статей сотрудников лаборатории гидро-

физики (в ядре РИНЦ – 103); суммарное число цитирований 2998 (в ядре РИНЦ ~ 1761), индекс Хирша (ИХ) – 33 (в ядре РИНЦ – 22). В базах данных Web of Sciences и Scopus зарегистрировано 105 статей; суммарное число цитирований > 1000; ИХ – 15; год начала роста цитирований – 2009. Можно отметить, что обзор гидрофизических исследований в озерах, покрытых льдом [Kirillin et al., 2012], подготовленный с участием сотрудников лаборатории, оказался востребован научным сообществом: на сегодняшний день зарегистрировано 239 цитирований этой публикации в базе данных РИНЦ и 352 в базах Web of Sciences и Scopus.

Литература

- Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Ред. Н. Н. Филатов, А. Ю. Тержевик. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 335 с.
- Бояринов П. М., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Петров М. П., Филатов Н. Н. Термика и динамика вод озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. С. 22–48.
- Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 174 с.
- Волков С. Ю., Богданов С. Р., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю. Крупномасштабная структура конвективного перемешанного слоя в мелководном озере подо льдом // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 30–39. doi: 10.7868/S2073667319010040
- Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Митрохов А. В., Тержевик А. Ю. Теплопоток на границе вода-донные отложения в небольшом озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 3–9. doi: 10.17076/lim72
- Голосов С. Д., Зверев И. С., Тержевик А. Ю. Вертикальная термическая структура и теплообмен в озере в период ледостава // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 3. С. 13–20. doi: 10.17076/lim464
- Долотов Ю. С., Филатов Н. Н., Шевченко В. П., Немова Н. Н., Римский-Корсаков Н. А., Денисенко Н. В., Кутчева И. П., Бояринов П. М., Петров М. П., Лифшиц В. Х., Платонов А. В., Демина Л. Л., Кухарев В. И., Коваленко В. Н., Здоровеннов Р. Э., Ратькова Т. Н., Сергеева О. М., Новигатский А. Н., Паутова Л. А., Филиппова К. В., Нюттик Е.-М., Лоренцен Х. Мониторинг приливно-отливных обстановок в эстуариях Карельского побережья Белого моря // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. С. 670–688.
- Долотов Ю. С., Филатов Н. Н., Шевченко В. П., Петров М. П., Толстиков А. В., Здоровеннов Р. Э., Платонов А. В., Филиппов А. С., Бушуев К. Л., Кутчева И. П., Денисенко Н. В., Штайн Р., Заукель К. Комплексные исследования в Онежском заливе Белого моря и эстуарии реки Онега в летний период // Океанология. 2008. Т. 48, № 2. С. 276–289.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Тержевик А. Ю. Влияние экстремально жаркого лета 2010 г. на температуру воды и распределение кислорода в озерах Карелии // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 67–75.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Белашев Б. З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 228–238. doi: 10.7868/S0321059616020024
- Зверев И. С., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Богданов С. Р., Гавриленко Г. Г., Волков С. Ю., Ефремова Т. В., Голосов С. Д., Тержевик А. Ю. Реакция мелководного озера на ветровую нагрузку в период открытой воды (по данным численных экспериментов на 3D-модели) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 5–17. doi: 10.17076/lim1297
- Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю. Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 57–63.
- Здоровеннов Р. Э., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э. Роль термогидрофизических процессов в распределении хлорофилла «а» в водной толще малого мезотрофного озера // Известия РГО. 2021. № 3. С. 47–62. doi: 10.31857/S0869607121030083
- Здоровеннова Г. Э., Шадрина А. А., Федорова И. В. Моделирование термического режима малых арктических озер // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 111–115.
- Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: Геос, 2008. 127 с.
- Митрохов А. В., Пальшин Н. И. Автономное устройство для измерения профиля температуры в придонных слоях воды и грунта. Патент на полезную модель RU 153787 U1, 27.07.2015. Заявка № 2014146400/28 от 18.11.2014.
- Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
- Пальшин Н. И. Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 86 с.
- Пальшин Н. И., Ефремова Т. В. Термическая структура озер Северо-Запада России в период ледостава // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 100–106. doi: 10.21782/GIPRO206-1619-2017-2(100-106)
- Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Ефремова Т. В., Гавриленко Г. Г., Тержевик А. Ю. Влияние весенней подледной освещенности и конвективного перемешивания на распределение хлорофилла «а» в малом мезотрофном озере // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 3. С. 259–269. doi: 10.31857/S0321-0596463259-269

Петров М. П., Тержевик А. Ю., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.

Петров М. П., Тержевик А. Ю., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162.

Петров М. П., Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом озер // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 546–554.

Радченко И. Г., Ильях Л. В., Шевченко В. П., Здорovenнов Р. Э., Новигатский А. Н., Политова Н. В., Толстиков А. В. Пространственное распределение фитопланктона в субарктическом эстуарии (р. Кемь, Белое море) // Океанология. 2019. Т. 59, № 3. С. 335–346.

Смирнов Е. М., Зайцев Д. К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2004. Т. 2(36). С. 70–81.

Тержевик А. Ю., Голосов С. Д., Гавриленко Г. Г., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Волков С. Ю., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Богданов С. Р. Возможное влияние «необычной» весны на режим растворенного кислорода в мелководном озере в летний период // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 17–27. doi: 10.17076/lim712

Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Bojarinov P., Glinsky A., Palshin N. Field investigation of winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake // *Limnol. Oceanogr.* 1996. Vol. 41, no. 7. P. 1502–1513.

Bogdanov S., Maksimov I., Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G., Smirnovsky A., Smirnov S., Efremova T., Terzhevik A. Anisotropic turbulence in the radiatively driven convective layer in a small shallow ice-covered lake: an observational study // *Bound.-Layer Meteorol.* 2023a. Vol. 187. P. 295–310. doi: 10.1007/s10546-022-00773-y

Bogdanov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Zdorovennova G. Short standing and propagating internal waves in an ice-covered shallow lake // *Water.* 2023b. 15(14). P. 2628. doi: 10.3390/w15142628

Bogdanov S. R., Zdorovennov R. E., Palshin N. I., Zdorovennova G. E., Terzhevik A. Yu., Gavrilenko G. G., Volkov S. Yu., Efremova T. V., Kuldin N. A., Kirillin G. B. Deriving of turbulent stresses in a convectively mixed layer in a shallow lake under ice by coupling two ADCPs // *Fundam. Appl. Hydrophys.* 2021a. Vol. 14(2). P. 17–28. doi: 10.7868/S2073667321020027

Bogdanov S., Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G. Deriving six components of Reynolds stress tensor from single-ADCP data // *Water.* 2021b. Vol. 13. P. 2389. doi: 10.3390/w13172389

Bogdanov S., Zdorovennova G., Volkov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A.,

Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions // *Inland Waters.* 2019. Vol. 9, no. 2. P. 177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655

Bouffard D., Zdorovennova G., Bogdanov S., Efremova T., Lavanchy S., Palshin N., Terzhevik A., Love Råman Vinnå, Volkov S., Wüest A., Zdorovennov R., Ulloa H. N. Under-ice convection dynamics in a boreal lake // *Inland Waters.* 2019. Vol. 9, no. 2. P. 142–161. doi: 10.1080/20442041.2018.1533356

Efremova T., Palshin N., Zdorovennov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // *Est. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 62(1). P. 33–41.

Fedorova I., Zdorovennov R., Kadutskiy V., Fedorov G., Shestakova E., Zdorovennova G., Guzeva A., Chernyshova M., Chetverova A., Frolova L., Nigamatzyanova G. Geochemical sensitivity of lacustrine ecosystems of Yamal Peninsula (Russian Arctic) to climate change // *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15069. doi: 10.5194/egusphere-egu21-15069, 2021

Filatov N., Johannessen O. M., Pozdnyakov D., Bobylev L. P., Pettersson L. White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Springer-Verlag London Ltd, 2005. 444 p. doi: 10.1007/3-540-27695-5

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice-covered lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43(7). P. 1661–1668.

Golosov S., Maher O. A., Schipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // *Oecologia.* 2007. Vol. 151. P. 331–340. doi: 10.1007/s00442-006-0543-8

Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // *Tellus A.* 2012. Vol. 64. Art. 17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Golosov S., Zverev I., Shipunova E., Terzhevik A. Modified parameterization of the vertical water temperature profile in the FLake model // *Tellus A.* 2018. Vol. 70, no. 1. Art. 1441247. doi: 10.1080/16000870.2018.1441247

Kirillin G., Aslamov I., Granin N., Kozlov V., Zdorovennov R. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: Observations from Lake Baikal and a new similarity model // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020. Vol. 24, no. 4. P. 1691–1708.

Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // *Aquat. Ecol.* 2009. Vol. 43. P. 641–651. doi: 10.1007/s10452-009-9274-3

Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmänn G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // *Environ. Model. Software.* 2011. Vol. 26. P. 683–684.

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

Kirillin G., Terzhevik A. Thermal instability in fresh-water lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation? // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2011. Vol. 65. P. 184–190.

Kouraev A. V., Zakharova E. A., Rémy F., Kostianoy A. G., Shimaraev M. N., Hall N. M. J., Zdorovenov R. E., Suknev A. Ya. Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017) // *Limnol. Oceanogr.* 2019. Vol. 64, iss. 6. P. 2738–2754. doi: 10.1002/lno.11338

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of thermo- and hydrodynamics in three small Karelian lakes during winter 1994/1995 / Department of Water Resources Engineering. Institute of Technology. University of Lund. 1996. Rep. № 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study on currents in a shallow ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43. P. 1669–1679.

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J., Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observations, scaling and a mixed-layer model // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, iss. C4. P. 7-1–7-16. doi: 10.1029/2001JC000892

Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Env. Res.* 2010. Vol. 15. P. 218–230.

Palshin N. I., Bogdanov S. R., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Belashev B. Z., Terzhevik A. Yu. Short internal waves in a small ice-covered lake // *Water Resources.* 2018. Vol. 45, no. 5. P. 695–705. doi: 10.1134/S0097807818050159

Smirnov S., Smirnovsky A., Zdorovenova G., Zdorovenov R., Palshin N., Novikova I., Terzhevik A., Bogdanov S. Water temperature evolution driven by solar radiation in an ice-covered lake: A numerical study and observational data // *Water.* 2022. Vol. 14(24). P. 4078. doi: 10.3390/w14244078

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Kirillin G., Shipunova E., Zverev I. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // *Aquat. Ecol.* 2009. Vol. 43. P. 617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Zdorovenova G. E., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu. Resonance generation of short internal waves by the barotropic seiches in an ice-covered shallow lake // *Physical Oceanography.* 2020. Vol. 27, iss. 4. P. 407–422. doi: 10.22449/0233-7584-2020-4-407-423

Volkov S., Bogdanov S., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Terzhevik A., Palshin N., Bouffard D., Kirillin G. Fine scale structure of convective mixed layer in ice-covered lake // *Environ. Fluid Mech.* 2018. Vol. 19, no. 3. P. 751–764. doi: 10.1007/s10652-018-9652-2

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G., Bansal S., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Erina O., Fedorova I., Fischer J. M., Grinberga L.,

Grossart H. P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier J., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak J. A., Sharma S., Wain D., Zdorovenov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming // *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. Art. 4974. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

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

Zdorovenova G., Palshin N., Efremova T., Zdorovenov R., Gavrilenko G., Volkov S., Bogdanov S., Terzhevik A. Albedo of a small ice-covered boreal lake: Daily, meso-scale and interannual variability on the background of regional climate // *Geosciences.* 2018. Vol. 8. Art. 206. doi: 10.3390/geosciences8060206

Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovenov R., Terzhevik A. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes // *Water.* 2021. Vol. 13(17). Art. 2435. doi: 10.3390/w13172435

Zdorovenov R. E., Gavrilenko G. G., Zdorovenova G. E., Palshin N. I., Efremova T. V., Golosov S. D., Terzhevik A. Yu. Optical properties of Lake Vendyurskoe // *Geography, Environment, Sustainability.* 2016. Vol. 9, no. 3. P. 74–87.

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

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Est. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 62. P. 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

References

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N. Field investigation of winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake. *Limnol. Oceanogr.* 1996;41(7):1502–1513.

Bogdanov S., Maksimov I., Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Smirnovsky A., Smirnov S., Efremova T., Terzhevik A. Anisotropic turbulence in the radiatively driven convective layer in a small shallow ice-covered lake: an observational study. *Bound.-Layer Meteorol.* 2023;187:295–310. doi: 10.1007/s10546-022-00773-y

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

Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Zdorovenova G. E., Terzhevik A. Yu., Gavrilenko G. G., Volkov S. Yu., Efremova T. V., Kuldin N. A., Kirillin G. B. Deriving of turbulent stresses in a convectively mixed layer in a shallow lake under ice by coupling two ADCPs.

Fundam. Appl. Hydrophys. 2021;14(2):17–28. doi: 10.7868/S2073667321020027

Bogdanov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Zdorovennova G. Short standing and propagating internal waves in an ice-covered shallow lake. *Water*. 2023;15(14):2628. doi: 10.3390/w15142628

Bogdanov S., Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G. Deriving six components of Reynolds stress tensor from single-ADCP data. *Water*. 2021;13:2389. doi: 10.3390/w13172389

Boyarinov P. M., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Petrov M. P., Filatov N. N. Thermal conditions and dynamics of lake waters. *Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy = Lake Onego. Environmental issues*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. P. 22–48. (In Russ.)

Boyarinov P. M., Petrov M. P. Processes of thermal regime formation in deep freshwater reservoirs. *Leninograd: Nauka*; 1991. 174 p. (In Russ.)

Bouffard D., Zdorovennova G., Bogdanov S., Efremova T., Lavanchy S., Palshin N., Terzhevik A., Love Råman Vinnå, Volkov S., Wüest A., Zdorovennov R., Ulloa H. N. Under-ice convection dynamics in a boreal lake. *Inland Waters*. 2019;9(2):142–161. doi: 10.1080/20442041.2018.1533356

Dolotov Yu. S., Filatov N. N., Petrov M. P., Tolstikov A. V., Zdorovennov R. E., Platonov A. V., Shevchenko V. P., Filippov A. S., Bushuev K. L., Kutcheva I. P., Denisenko N. V., Stein R., Saukel C. Multidisciplinary studies in Onega Bay of the White Sea and the estuary of the Onegariver during the summer period. *Oceanology*. 2008;48(2):255–267.

Dolotov Yu. S., Filatov N. N., Shevchenko V. P., Nemova N. N., Rimskii-Korsakov N. A., Denisenko N. V., Kutcheva I. P., Boyarinov P. M., Petrov M. P., Lifshitz V. Kh., Platonov A. V., Demina L. L., Kukharev V. I., Kovalenko V. N., Zdorovennov R. E., Rat'kova T. N., Sergeeva O. M., Novigatskii A. N., Pautova L. A., Filipieva K. V., Nothig E.-M., Loronzen C. Monitoring tidal conditions in estuaries of the Karelian coast of the White Sea. *Water Resources*. 2005;32(6):611–628.

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Belashev B. Z. Water temperature of lakes of different types in Karelia under conditions of climate change (according to the instrumental measurements in 1953–2011). *Vodnye resursy = Water Resources*. 2016;43(2):228–238. doi: 10.7868/S0321059616020024 (In Russ.)

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovennova G. E., Terzhevik A. Yu. The effects of the extremely hot summer of 2010 on water temperature and oxygen distribution in lakes of Karelia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2015;9:67–75. (In Russ.)

Efremova T., Palshin N., Zdorovennov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes. *Est. J. Earth Sci.* 2013;62(1):33–41.

Fedorova I., Zdorovennov R., Kadutskiy V., Fedorov G., Shestakova E., Zdorovennova G., Guzeva A., Chernyshova M., Chetverova A., Frolova L., Nigmatzyanova G. Geochemical sensitivity of lacustrine ecosystems of the Yamal Peninsula (Russian Arctic) to climate change. *EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15069*. doi: 10.5194/egusphere-egu21-15069, 2021

Filatov N. N. (ed.). *Lake Onego. Atlas*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)

Filatov N., Johannessen O. M., Pozdnyakov D., Bobylev L. P., Pettersson L. *White Sea: its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change*. Springer-Verlag London Ltd; 2005. 444 p. doi: 10.1007/3-540-27695-5

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

Filatov N. N., Terzhevik A. Yu. (eds.). *The White Sea and its catchment under the impact of climatic and anthropogenic factors*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 335 p. (In Russ.)

Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N. I., Mitrokhov A. V., Terzhevik A. Yu. Heat flux at the water-sediment interface in a shallow lake. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2015;9:3–9. doi: 10.17076/lim72 (In Russ.)

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice-covered lakes. *Limnol. Oceanogr.* 1998;43(7):1661–1668.

Golosov S., Maher O. A., Schipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. *Oecologia*. 2007;151:331–340. doi: 10.1007/s00442-006-0543-8

Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A*. 2012;64:17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Golosov S. D., Zverev I. S., Terzhevik A. Yu. Vertical thermal structure and heat exchange in ice covered lake. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2017;3:13–20. doi: 10.17076/lim464 (In Russ.)

Golosov S., Zverev I., Shipunova E., Terzhevik A. Modified parameterization of the vertical water temperature profile in the FLake model. *Tellus A*. 2018;70(1):1441247. doi: 10.1080/16000870.2018.1441247

Ibraev R. A. *Mathematical modeling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea*. Moscow: Geos; 2008. 127 p. (In Russ.)

Kirillin G., Aslamov I., Granin N., Kozlov V., Zdorovennov R. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: Observations from Lake Baikal and a new similarity model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020;24(4):1691–1708.

Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany. *Aquat. Ecol.* 2009;43:641–651. doi: 10.1007/s10452-009-9274-3

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

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

Kirillin G., Terzhevik A. Thermal instability in freshwater lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation? *Cold Reg. Sci. Technol.* 2011;65:184–190.

Kouraev A. V., Zakharova E. A., Rémy F., Kostianoy A. G., Shimaraev M. N., Hall N. M. J., Zdorovenov R. E., Suknev A. Ya. Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017). *Limnol. Oceanogr.* 2019;64(6):2738–2754. doi: 10.1002/lno.11338

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of thermo- and hydrodynamics in three small Karelian lakes during winter 1994/1995. Department of Water Resources Engineering. Institute of Technology. University of Lund. 1996. Rep. № 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study on currents in a shallow ice-covered lake. *Limnol. Oceanogr.* 1998;43:1669–1679.

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

Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., Jonas T., Malm J., Farmer D. Radiatively-driven convection in ice-covered lakes: observations, scaling and a mixed-layer model. *J. Geophys. Res.* 2002;107(C4):7-1–7-16. doi: 10.1029/2001JC000892

Mitrokhov A. V., Pal'shin N. I. An autonomous device for measuring the temperature profile in the bottom layers of water and soil. Utility model patent RU 153787 U1, 27.07.2015. Application No. 2014146400/28 dated 18.11.2014. (In Russ.)

Palshin N. I., Bogdanov S. R., Zdorovennova G. E., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Belashev B. Z., Terzhevik A. Yu. Short internal waves in a small ice-covered lake. *Water Resources.* 2018;45(5):695–705. doi: 10.1134/S0097807818050159

Pal'shin N. I., Efremova T. V. Thermal structure of lakes in the North-West of Russia during the ice period. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources.* 2017;2:100–106. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(100-106) (In Russ.)

Pal'shin N. I. Thermal and hydrodynamic processes in lakes during the ice period. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. 86 p. (In Russ.)

Pal'shin N. I., Zdorovennova G. E., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu. Influence of spring under-ice illumination and convective mixing on the distribution of chlorophyll 'a' in a small mesotrophic lake. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2019;46(3):259–269. doi: 10.31857/S0321-0596463259-269 (In Russ.)

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovennova G. E. Absorption of solar radiation by the snow-ice cover of lakes. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2005;32(5):546–554. (In Russ.)

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovennova G. E. Features of the thermal structure of a shallow lake at the beginning of winter. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2006;33(2):154–162. (In Russ.)

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovennova G. E. Movements of water in a shallow lake covered with ice. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2007;34(2):131–140. (In Russ.)

Radchenko I. G., Ilyash L. V., Shevchenko V. P., Novigatsky A. N., Politova N. V., Zdorovenov R. E., Tolstikov A. V. Spatial distribution of phytoplankton in the subarctic estuary (Kem River, The White sea). *Oceanology.* 2019;59(3):305–315.

Smirnov S., Smirnovsky A., Zdorovennova G., Zdorovenov R., Palshin N., Novikova I., Terzhevik A., Bogdanov S. Water temperature evolution driven by solar radiation in an ice-covered lake: A numerical study and observational data. *Water.* 2022;14(24):4078. doi: 10.3390/w14244078

Smirnov E. M., Zaitsev D. K. Finite volume method as applied to hydro- and gas dynamics and heat transfer problems in complex geometry domains. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU = St. Petersburg State Polytechnical University Journal.* 2004;2(36):70–81. (In Russ.)

Terzhevik A. Yu., Golosov S. D., Gavrilenko G. G., Zdorovenov R. E., Zdorovennova G. E., Volkov S. Yu., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Bogdanov S. R. The possible effect of an unusual spring on the dissolved oxygen in a shallow lake during the summer. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2017;10:17–27. doi: 10.17076/lim712 (In Russ.)

Terzhevik A., Golosov S., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovennova G., Kirillin G., Shipunova E., Zverev I. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. *Aquat. Ecol.* 2009;43:617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenov R. E., Zdorovennova G. E., Mitrokhov A. V., Potahin M. S., Shipunova E. A., Zverev I. S. Hydrophysical aspects of the formation of the oxygen regime of an ice-covered shallow lake. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2010;37(5):568–579. (In Russ.)

Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Zdorovennova G. E., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu. Resonance generation of short internal waves by the barotropic seiches in an ice-covered shallow lake. *Physical Oceanography.* 2020;27(4):407–422. doi: 10.22449/0233-7584-2020-4-407-423

Volkov S., Bogdanov S., Zdorovenov R., Zdorovennova G., Terzhevik A., Palshin N., Bouffard D., Kirillin G. Fine scale structure of convective mixed layer in ice-covered lake. *Environ. Fluid Mech.* 2018;19(3):751–764. doi: 10.1007/s10652-018-9652-2

Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Zdorovenov R. E., Pal'shin N. I., Terzhevik A. Yu. Large-scale structure of a convective mixed layer in an ice-covered shallow lake. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics.* 2019;12(1):30–39. doi: 10.7868/S2073667319010040 (In Russ.)

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H. Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G., Bansal S., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H.,

Erina O., Fedorova I., Fischer J. M., Grinberga L., Grossart H. P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier J., Palshin N., Peterzell M., Pulkkanen M., Rusak J. A., Sharma S., Wain D., Zdorovenov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nat. Commun.* 2022;13:4974. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

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

Zdorovenova G., Palshin N., Efremova T., Zdorovenov R., Gavrilenko G., Volkov S., Bogdanov S., Terzhevik A. Albedo of a small ice-covered boreal lake: Daily, meso-scale and interannual variability on the background of regional climate. *Geosciences*. 2018;8:206. doi: 10.3390/geosciences8060206

Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovenov R., Terzhevik A. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes. *Water*. 2021;13(17):2435. doi: 10.3390/w13172435

Zdorovenova G. E., Shadrina A. A., Fedorova I. V. Modeling the thermal regime of small Arctic lakes. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2016;1:111–115. (In Russ.)

Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Zdorovenova G. E. The role of thermohydrophysical

processes in the distribution of chlorophyll 'a' in the water column of a small mesotrophic lake. *Izvestiya RGO = Izvestia RGO*. 2021;3:47–62. doi: 10.31857/S0869607121030083 (In Russ.)

Zdorovenov R. E., Gavrilenko G. G., Zdorovenova G. E., Palshin N. I., Efremova T. V., Golosov S. D., Terzhevik A. Yu. Optical properties of Lake Vendyurskoe. *Geography, Environment, Sustainability*. 2016;9(3):74–87.

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

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Est. J. Earth Sci.* 2013;62:26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Pal'shin N. I., Terzhevik A. Yu. Variability of thermal and oxygen regimes of a shallow lake in winter. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2011;4:57–63. (In Russ.)

Zverev I. S., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Pal'shin N. I., Bogdanov S. R., Gavrilenko G. G., Volkov S. Yu., Efremova T. V., Golosov S. D., Terzhevik A. Yu. Response of a shallow lake to wind load during open water period (according to numerical experiments on 3D model). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;9:5–17. doi: 10.17076/lim1297 (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 11.09.2023; принята к публикации / accepted: 02.10.2023.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Терзhevik Аркадий Юрьевич

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

Пальшин Николай Иннокентьевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: npalshin@mail.ru

Ефремова Татьяна Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

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

Богданов Сергей Рэмович

докт. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

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

Голосов Сергей Дмитриевич

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

e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Зверев Илья Сергеевич

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

e-mail: iliazverev@mail.ru

Волков Сергей Юрьевич

младший научный сотрудник

e-mail: TARANARMO@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Terzhevik, Arkady

Cand. Sci. (Tech.), Leading Researcher

Palshin, Nikolai

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Efremova, Tatyana

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Bogdanov, Sergey

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

Golosov, Sergey

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

Zverev, Iliia

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

Volkov, Sergey

Junior Researcher

Митрохов Андрей Васильевич

главный гидролог

e-mail: a.mitrokhov@list.ru

Смирнов Сергей Игоревич

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник

e-mail: sergeysmirnov92@mail.ru

Здоровеннов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Здоровеннова Галина Эдуардовна

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

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Mitrokhov, Andrey

Chief Hydrologist

Smirnov, Sergey

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

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Zdorovennova, Galina

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

УДК 556.555.5:551.321.6 + 551.312 (282.247.181.1)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ИМАНДРА МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Ю. С. Новикова^{1*}, П. А. Рязанцев², Ю. А. Дворников^{3,4},
Н. В. Двоеглазова^{5,6}, А. В. Толстикова¹, М. Н. Игнатьева⁷

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

² Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

³ Научный центр «Смарт-технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений», Аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов (ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198)

⁴ Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (Пыжевский пер., 3, Москва, Россия, 119017)

⁵ Балтийский федеральный университет им. И. Канта (ул. А. Невского, 14, Калининград, Россия, 236041)

⁶ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997)

⁷ Московский государственный университет (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991)

В рамках Второй школы-практики полярных лимнологов в г. Апатиты на научной базе «Тиетта» Кольского научного центра РАН участники получили базовые навыки георадарной съемки для решения задач лимнологии. Георадиолокация выполнялась на покрытом льдом озере Имандра для изучения параметров льда и донных отложений в пространственном разрезе. Выполнение ручных измерений и георадарной съемки льда позволили определить толщину снежного покрова, белого и кристаллического слоев льда. В результате георадарной съемки также выделены особенности морфологии дна и определены глубины залегания литологических границ. Достоверность определения глубины подтверждена измерениями STD-зондирования.

Ключевые слова: озеро Имандра; георадиолокация; STD-зондирование; толщина льда; параметры донных отложений

Для цитирования: Новикова Ю. С., Рязанцев П. А., Дворников Ю. А., Двоеглазова Н. В., Толстикова А. В., Игнатьева М. Н. Определение структуры ледяного покрова и параметров донных отложений озера Имандра методом георадиолокации // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 23–31. doi: 10.17076/lim1799

**Iu. S. Novikova^{1*}, P. A. Ryazantsev², Yu. A. Dvornikov^{3,4}, N. V. Dvoeglazova^{5,6},
A. V. Tolstikov¹, M. N. Ignatieva⁷. SURVEY OF ICE-COVER STRUCTURE AND SEDIMENT
PARAMETERS OF LAKE IMANDRA BY GROUND-PENETRATING RADAR**

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *NovYuliana@gmail.com

² Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St.,
185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

³ Smart Urban Nature Research Laboratory, Agrarian-technological Institute, Peoples' Friendship
University of Russia (6 Miklukho-Maklaya St., 117198 Moscow, Russia)

⁴ A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences (3 Pyzhyovskiy Per.,
119017 Moscow, Russia)

⁵ Immanuel Kant Baltic Federal University (14 Al. Nevsky St., 236041 Kaliningrad, Russia)

⁶ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36 Nakhimovskiy prospect, 117997,
Moscow, Russia)

⁷ Moscow State University (1 Leninskie gory, 119991 Moscow, Russia)

Participants of the 2nd hands-on school for polar limnologists in Apatity at the Tietta Research Station of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences taught basic skills of using ground-penetrating radar (GPR) survey to solve limnology problems. GPR survey was carried out on the ice-covered Lake Imandra to study the parameters of ice and bottom sediments in the spatial resolution. With the help of manual measurements and GPR sensing of the ice, the participants determined the thickness of the snowcover, white and crystalline ice layers. As a result of the GPR survey, the bottom morphology and the bedding depth of lithological boundaries were determined. The depth determinations were validated by CTD measurements.

Keywords: Lake Imandra; ground-penetrating radar (GPR) survey; CTD measurement; ice thickness; sediment parameters

For citation: Novikova Iu. S., Ryazantsev P. A., Dvornikov Yu. A., Dvoeglazova N. V., Tolstikov A. V., Ignatieva M. N. Survey of ice-cover structure and sediment parameters of Lake Imandra by ground-penetrating radar. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 23–31. doi: 10.17076/lim1799

Введение

Изучение строения котловин озер и слагающих их донных осадков традиционно проводится в зимний период, поскольку работа со льда упрощает отбор стратиграфических колонок. При выборе точек пробоотбора важно понимать глубину водоема и особенности толщи озерных осадков. Зачастую для оценки глубины водоемов используется эхолокация. Однако при работе со льда у нее есть ряд недостатков, например малая дискретизация, так как под каждую точку лоцирования нужно подготовить отдельную лунку. Также эхолокация не предоставляет данных о строении донных осадков. Альтернативным способом для картографирования батиметрии озер выступает георадиолокация – метод, основанный на регистрации отраженной высокочастотной электромагнитной волны. Георадиолокация кроме определения положения кровли донных осадков с поверхности льда позволяет получить информацию об их строении и составе [Moorman, 2002]. При этом георадиолокация также не лишена ряда недо-

статков, таких как ограниченная глубина зондирования, связанная с электропроводностью воды, влиянием приповерхностных неоднородностей, в первую очередь слоя льда [Arcone et al., 2006; Лаломов, Глазунов, 2017].

Георадиолокация хорошо зарекомендовала себя при палеолимнологических исследованиях малых озер, обеспечивая сбор большого количества данных о строении котловин и мощности донных осадков, трассирование седиментационных границ и поиск тектонических разломов [Moorman, 2002; Sambuelli, Bava, 2012; Lachhab et al., 2015]. Следует отметить ряд успешных примеров георадарной съемки на озерах Карело-Кольского региона, что связано в том числе с низкой минерализацией природных вод в регионе [Родионов и др., 2018; Старовойтов и др., 2019; Ryazantsev et al., 2021].

Наряду с изучением котловин озер актуальной задачей является установление параметров ледяного покрова. Изучение льда на водоемах является важной задачей для умеренных и высоких широт, поскольку образование, разрушение и длительность периода устойчивого

ледяного покрова напрямую влияют на гидрологические и биогеохимические процессы водоемов. Многие авторы отмечают изменение в сроках установления и вскрытия льда на озерах, а также сокращение времени ледостава ввиду наблюдающихся глобальных изменений температуры воздуха, других климатических и локальных геоморфологических параметров [Sharma и др., 2019]. По имеющимся оценкам, большую роль играют региональные особенности водоемов, поскольку фенология льда определяется широтой и морфометрией места, теплообменом, ветровой обстановкой, осадками, что в значительной степени усложняет моделирование и прогноз будущих изменений [Sharma и др., 2019]. Изменение параметров льда, таких как его толщина, прозрачность и структура, малоизучены, однако также являются важными с точки зрения геоэкологических процессов озер и безопасности нахождения на льду. Например, оценки проб льда на озерах арктической и умеренной зон в период теплой зимы 2020–2021 гг. показали, что толщина льда увеличивалась в течение периода ледостава, а доля белого льда становилась преобладающей над кристаллическим на конец зимы – начало весны, что существенно уменьшает его несущую способность [Weyhenmeyer et al., 2022]. Образование белого льда происходит на поверхности установившегося ледяного покрова путем таяния и замерзания накапливающегося снега, выпадения дождя на снежный покров, а также просачивания озерной воды через трещины и замерзания образовавшейся водно-снежной массы. Все эти процессы возможны при колебаниях температуры около точки замерзания [Kirillin et al., 2012]. Впоследствии увеличение толщины белого льда влечет за собой изменение процессов внутри водоема – уменьшается поступление солнечной радиации непосредственно под лед из-за его малой прозрачности, в связи с чем ослабевает теплообмен между слоями воды и снижается скорость фотосинтеза как начальной стадии жизненного цикла организмов [Jansen et al., 2021]. Актуальным вопросом остается изменчивость параметров льда по площади озер в течение периода ледостава ввиду слабой изученности, поэтому возникает необходимость использования новых методов его оценки.

С учетом описанных выше вопросов, стоящих перед лимнологией, а также малой апробацией метода георадиолокации весьма актуальны опытно-методические георадиолокационные работы в различных природных условиях и сравнение полученных результатов с данными, полученными другими методами.

Цель работы заключалась в создании методики совместного использования георадиолокации, зондирования водной толщи STD-зондом и измерений слоев озерного льда для изучения изменчивости толщины и структуры озерного льда по площади озер, уточнения глубин акватории и изучения структуры донных отложений.

Материалы и методы

В основе исследования лежат полевые материалы, полученные в апреле 2023 г. со льда на оз. Имандра в рамках работы Второй школы-практики полярных лимнологов в г. Апатиты (научная станция «Тиетта» Кольского научного центра РАН).

Озеро Имандра располагается на северо-западе европейской территории России и является самым крупным водоемом в Мурманской области, площадь которого около 900 км². Озеро представляет интерес наряду с другими водными объектами Арктического региона в спектре последствий изменения климата. Котловина озера находится в тектонической депрессии, которая простирается с севера на юг от Кольского залива Баренцева моря до Кандалакшского залива Белого моря. Озеро подвержено сильной антропогенной нагрузке из-за множества месторождений полезных ископаемых в регионе и развития обширного производственного комплекса, в который входят предприятия горнодобывающей промышленности (АО «Апатит»), металлургической промышленности (цветная металлургия – ОАО «Североникель»; черная металлургия – ОАО «Олкон» и ОАО «Ковдорский ГОК»), энергетического комплекса (каскад Нивских ГЭС, Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ). Свой вклад вносят и хозяйственно-бытовые стоки городов Оленегорска, Мончегорска, Кировска, Апатитов и других населенных пунктов, расположенных на водосборе озера [Даувальтер, Кашулин, 2019]. Поскольку значимость антропогенной нагрузки на озеро становится сопоставимой с природной, остается актуальным вопрос о необходимости проведения комплексного мониторинга и отслеживания динамики гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических показателей воды.

На первом этапе работы было выбрано направление трассы от научной базы в сторону открытой части озера (рис. 1). Для оценки структуры льда проводилось сопоставление толщины и структуры выпиленного блока ледяного покрова оз. Имандра и данных георадиолокационного профилирования. Далее по

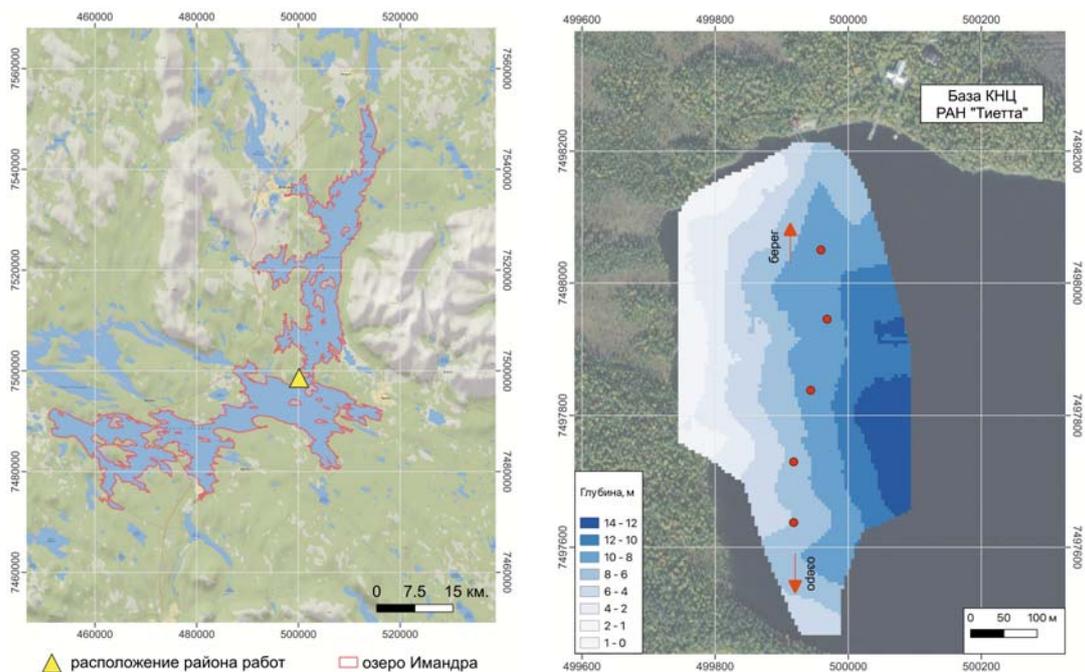


Рис. 1. Расположение научной станции «Тьетта» (слева) и карта-схема района исследования (справа). Маршрут исследования построен в направлении берег-озеро. Точками обозначены станции CTD-зондирования

Fig. 1. Location of the Tietta research station (left) and the schematic map of the study area (right). The research track was in the coast-lake direction. The dots indicate CTD-measuring stations

профилям выполнялось картирование дна. В качестве вспомогательного оборудования для корректировки полученных радарограмм использовался CTD-зонд CastAway (США) со встроенным GPS-приемником, который предназначен для получения информации о распределении температуры, давления и электропроводности водной толщи с точностью до сотых. Значения давления, измеренные CTD-зондом, позволили скорректировать границу вода-дно, полученную при помощи георадиолокации.

Метод георадиолокации основан на генерировании электромагнитного импульса и регистрации отраженного сигнала от физических неоднородностей изучаемой среды [Владов, Старовойтов, 2004]. В данной работе глубина зондирования сигнала зависит от электрофизических свойств воды и донных осадков. Лед из-за своих электрофизических свойств является благоприятным объектом для георадарных исследований. При благоприятных условиях глубина зондирования может быть несколько метров в зависимости от центральной частоты антенного блока. Ограничивающим фактором служит вода на поверхности и внутри ледового монолита. Наличие такого контрастного слоя создает множественные переотражения сигнала, которые ухудшают качество записи и могут

привести к полной невозможности выявления границы. Особенно такие эффекты наблюдаются при измерениях в весенний период.

Для выполнения исследований использовался георадар «ОКО-2» («Логис-Геотех», Россия) с двумя антенными блоками с центральной частотой 100 и 400 МГц. Антенна 100 МГц применялась для изучения донных осадков, а 400 МГц – для изучения свойств льда. Съёмка выполнялась путем буксирования георадара по льду и регистрации дистанции одометром. Регистрация отраженного сигнала осуществлялась во временном окне до 800 нс. Шаг георадарных трасс по профилю составлял 5 см. Данные записываются в виде трассы, имеющей такие параметры, как время прихода, амплитуда и фаза сигнала. Набор таких трасс формирует радарограмму, представленную временным разрезом, где горизонтальная ось – положение трасс, а вертикальная – время прихода сигнала. При съёмке со льда на радарограмме формируются высокоамплитудные резонансные отражения [Arcone et al., 2006], поэтому верхняя часть полученного профиля была довольно сильно зашумлена. В связи с этим проводилась дополнительная обработка первичных записей в программе GeoScan32 («Логис-Геотех», Россия). Для дальнейшей интерпретации

и анализа данных осуществлялся переход от временного разреза к глубинному посредством скоростного анализа, который заключался в определении скорости распространения сигнала в различных средах.

Результаты исследования

Результаты георадарной оценки толщины льда на примере станции отбора ледяного блока приведены на рис. 2. На фрагменте радарограммы фиксируется несколько четких осей синфазности, соответствующих основным границам слоев льда. Границы пикировались по максимальной амплитуде отраженного сигнала. Первая ось соответствует границе белого льда под снегом. Ручные измерения показали толщину снежного покрова равную 9 см, в результате чего для этого слоя была рассчитана скорость георадарного сигнала (V) равная 9,7 см/нс. Ниже располагается слой белого льда, толщина которого составила 43,5 см, что позволяет вычислить $V = 7,8$ см/нс. Третий слой соответствует кристаллическому льду толщиной 23 см и вычисленной скорости $V = 11,2$ см/нс. Следует отметить, что на границе белого и кристаллического льда обнаружился слой воды толщиной около 3 см. Однако вертикальной разрешаю-

щей способности антенного блока с центральной частотой 400 МГц было недостаточно для его выделения, вследствие чего отраженный от этого слоя сигнал сливается с сигналом, отраженным от кровли кристаллического льда.

С использованием скоростей сигнала георадара, установленных на основе ручных замеров, были пикированы границы льда на радарограмме на протяжении всего профиля озера длиной 500 м. В результате определено, что средние значения толщины белого льда вдоль профиля составляют 30,2 см, при минимальном значении 29,6 см и максимальном 48,9 см. Оценка толщины кристаллического льда показала среднее значение 24,4 см, а также 19,9 и 31,5 см для минимального и максимального значений соответственно. Максимальные показатели льда фиксировались в прибрежной части, что, вероятно, связано с большим количеством снега, из которого образуется белый лед.

Обнаружение данной вариативности толщины льда может говорить о неравномерном нарастании и таянии льда в связи с разными причинами – например, с неоднородностью накопления снега на поверхности льда, вследствие его ветрового перераспределения по площади озера, а также с гидрологическими процессами, происходящими непосредствен-

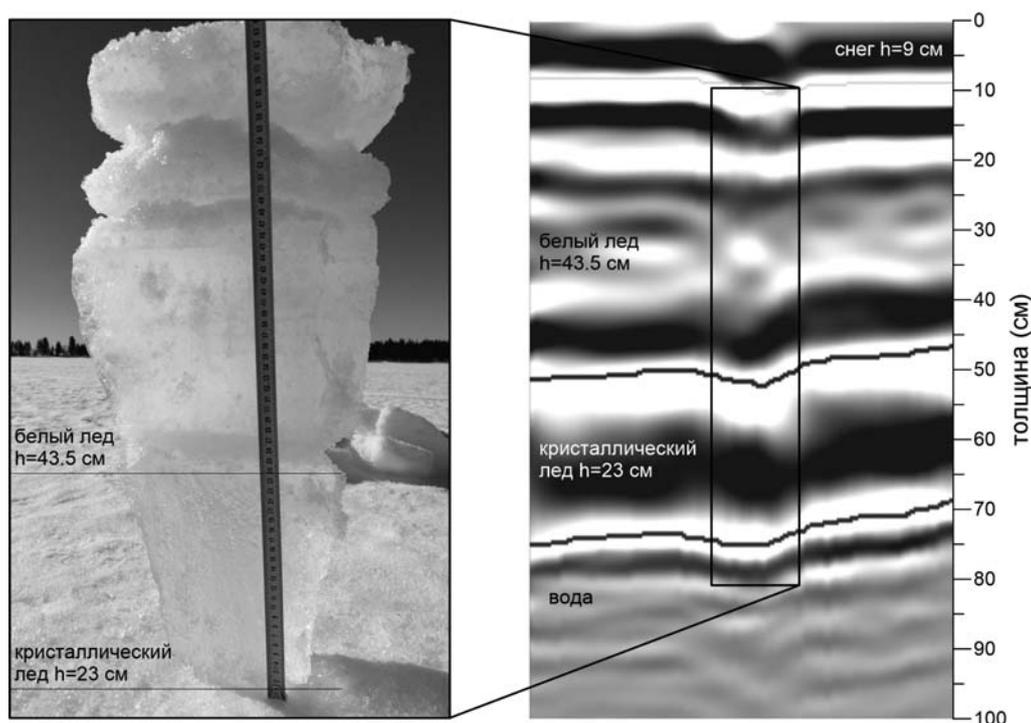


Рис. 2. Фрагмент радарограммы и соответствующий образец озерного льда
 Fig. 2. A fragment of the GPR cross-section and a corresponding lake ice sample

но подо льдом. В этой связи, например, изучалось влияние гидродинамики подледного слоя на величину теплового потока из воды в лед [Kirillin et al., 2020].

Георадиолокационный профиль с использованием антенны 100 МГц, проходящий от берега на протяжении 500 м, демонстрирует изменчивость морфологии дна, а также некоторую неоднородность состава донных отложений (рис. 3). При скоростном анализе для каждого из выделенных слоев рассчитаны характерные скорости для слоя льда ($V = 10,6$ см/нс), воды ($V = 3,3$ см/нс), ила ($V = 3,8$ см/нс) и минеральных грунтов ($V = 6,7$ см/нс). Скорости определялись путем анализа дифрагированной волны, который позволяет определить диэлектрическую проницаемость (ϵ) по наклону крыльев гиперболы, сформированных на локальных объектах, залегающих в толще исследуемого слоя. Для льда и воды использованы характерные справочные значения ϵ , равные 4 и 81 соответственно. На основе средних величин диэлектрической проницаемости, в илах равной 60 и в минеральном грунте равной 30, рассчитывалась скорость георадарного сигнала. Кроме того, привлекались справочные материалы по донным осадкам озер [Moogman, 2002]. В среднем глубина озера вдоль профиля наблюдений составила 8,2 м с минимумом 4,2 м и максимумом 9,6 м. Что касается литологических неоднородностей, то по радарограмме явно читается локальная котловина на пикетах 0–180 м, заполненная толщей органического ила мощностью до 1,9 м, что выражено в субгоризон-

тальной георадарной фации. При этом на большей части дна вдоль профиля органический ил имеет мощность примерно 0,5–1 м. Под илом расположено минеральное основание дна озера, представленное, вероятно, мореной, о чем свидетельствует «хаотичная» георадарная фация. В диапазоне пикетов 360–420 м обнаружено поднятие дна, сложенное преимущественно каменистым материалом, на что указывает большое количество гипербол дифрагированной волны. Высота такого поднятия 1,4 м, а угол склонов 2° , таким образом, предполагается, что это луда.

Исследование гидрофизических параметров водной толщи STD-зондом продемонстрировало характерный профиль температуры для покрытого льдом озера – почти однородный конвективно-перемешанный слой с относительно тонким стратифицированным слоем у поверхности. Также анализ радарограммы совместно с измерениями STD-зонда показывает, что в области повышенной мощности органических илов фиксируется небольшое увеличение температуры и электропроводности в придонном слое. Сопоставление измерений глубин по данным георадиолокации и STD-зонда продемонстрировало сходимость полученных оценок (рис. 4). Использование небольшой выборки не позволяет точно рассчитать невязку и определить ее источники. На данном этапе можно отметить возрастание невязки с глубиной из-за уменьшения резкости отражающих границ и, как следствие, проблематичность их выявления и пикирования.

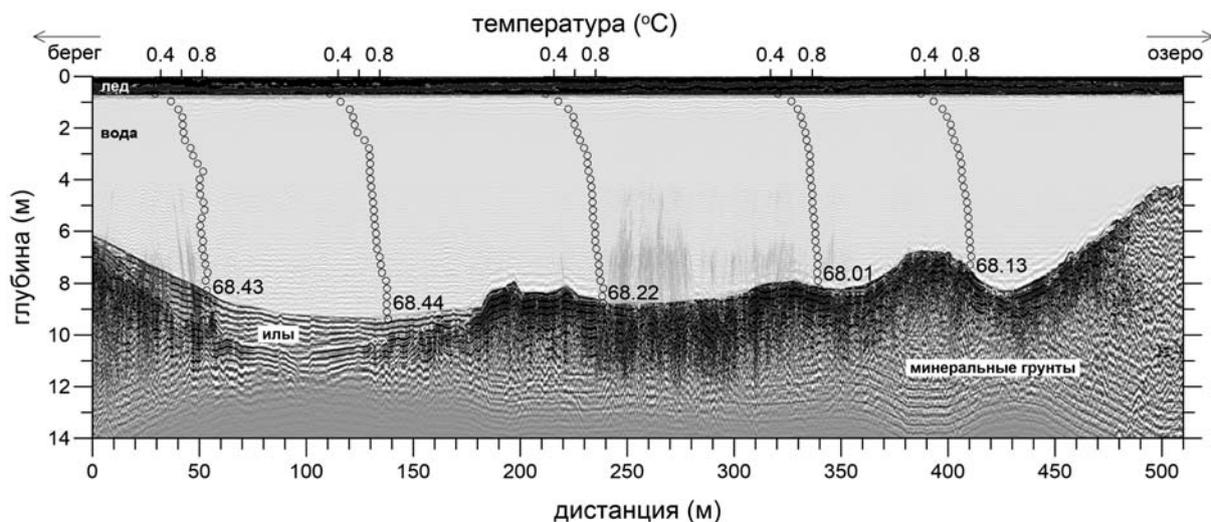


Рис. 3. Радарограмма с нанесенными профилями температуры по данным STD-зонда. Для каждой станции STD-зондирования указано значение электропроводности у дна в мкС/см

Fig. 3. GPR cross-section and profiles of temperature by CTD-measuring. Bottom conductivity values are given for each CTD-measuring station in $\mu\text{S}/\text{cm}$

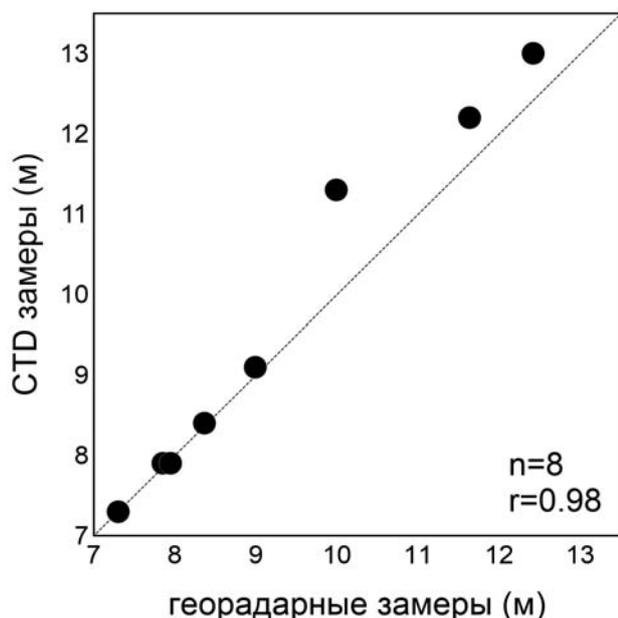


Рис. 4. Сопоставление контактных (СТД-зонд) и бесконтактных (георадар) оценок глубины озера Имандра
 Fig. 4. Comparison of CTD-measuring and GPR-survey assessments of the Lake Imandra depth

Выводы

Сопоставление ручных измерений слоев образца озерного льда и снега и результатов георадиолокации с антенной 400 МГц позволило определить скорость распространения сигнала в каждом из слоев. Полученные скорости можно использовать для исследований других водных объектов, однако в этом случае необходимо понимать конструкцию льда в каждый измеряемый период. Толщина белого и кристаллического льда может варьироваться, может наблюдаться разная толщина прослоев воды и степень влажности снега на поверхности, в результате чего значительно меняется и скорость в верхней части профиля. Последующая пространственная съемка по акватории озера позволила установить толщину и структуру озерного льда. Такой подход позволяет быстро оценивать изменчивость толщины и структуры льда по акватории озера и производить картографирование этих параметров.

Выполненные исследования показали высокую сходимость измерения глубины на пространственном разрезе бесконтактным и контактным способом. Полученные результаты позволяют рассматривать метод георадиолокации как вспомогательный при выполнении гидрологических работ в зимний период на малых водоемах с максимальными глубинами

около 10 м. Предварительная съемка георадаром по профилям позволяет выявить особенности строения дна и оптимизировать сеть точек СТД-наблюдений и отбора колонок донных отложений.

Литература

Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. М.: МГУ, 2004. 153 с.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Фоновые содержания элементов в донных отложениях озера Имандра // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10, № 4. С. 13–30. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.13-30

Лаломов Д. А., Глазунов В. В. Установление зависимости между минерализацией и добротностью на основе георадиолокационных данных // Георесурсы. 2017. Т. 1, № 19. С. 69–77. doi: 10.18599/grs.19.1.11

Родионов А. И., Николаева С. Б., Рязанцев П. А. Оценка возможностей георадиолокации при изучении сейсмогенных нарушений и деформаций в донных осадках (на примере озера Уполокшское, северо-восток Фенноскандинавского щита) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 4. С. 1189–1203. doi: 10.5800/GT-2018-9-4-0390

Старовойтов А. В., Валиуллина К. З., Ошкин А. Н., Пятилова А. М. Строение осадочного чехла на пресноводных озерах полуострова Киндо вблизи Беломорской биологической станции МГУ по данным георадиолокации и бурения // Вестник Московского университета. 2019. № 6. С. 87–99. doi: 10.33623/0579-9406-2019-6-87-98

Arcone S. A., Finnegan D. C., Liu L. Target interaction with stratigraphy beneath shallow, frozen lakes: Quarter-wave resonances within GPR profiles // Geophysics. 2006. Vol. 71, no. 6. P. K119–K131. doi: 10.1190/1.2358404

Jansen J., MacIntyre S., Barrett D. C., Chin Y.-P., Cortés A., Forrest A. L., Hrycik A. R., Martin R., McMeans B. C., Rautio M., Schwefel R. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2021. Vol. 126, no. 6. e2020JG006237. doi: 10.1029/2020JG006237

Kirillin G., Aslamov I., Kozlov V., Zdorovenov R., Granin N. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: observations from Lake Baikal and a new similarity model // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 1691–1708. doi: 10.5194/hess-24-1691-2020

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt Ch., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova G., Zdorovenov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquat. Sci. 2012. Vol. 74. P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Lachhab A., Booterbaugh A., Beren M. Bathymetry and sediment accumulation of Walker Lake, PA using two GPR antennas in a new integrated method // J. Environ. Eng. Geophys. 2015. Vol. 20, no. 3. P. 245–255. doi: 10.2113/JEEG20.3.245

Moorman B. J. Ground-penetrating radar applications in paleolimnology // Tracking Environmental

Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research / Eds. W. M. Last, J. P. Smol. Springer, 2002. Vol. 1. P. 23–47. doi: 10.1007/0-306-47669-X_3

Ryazantsev P., Rodionov A., Subetto D. Waterborne GPR mapping of stratigraphic boundaries and turbidite sediments beneath the bottom of Lake Polevskoye, Karelia, NW Russia // *Journal of Paleolimnology*. 2021. Vol. 66, no. 3. P. 261–277. doi: 10.1007/s10933-021-00205-w

Sambuelli L., Bava S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. // *J. Appl. Geophys.* 2012. Vol. 81. P. 48–56. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.016

Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., O'Reilly C. M., Oliver S., Batt R. D., Magee M. R., Straile D., Weyhenmeyer G. A., Winslow L., Woolway R. I. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nat. Clim. Chang.* 2019. Vol. 9, no. 3. P. 227–231. doi: 10.1038/s41558-018-0393-5

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G., Bansal Sh., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Erina O., Fedorova I., Fischer J. M., Grinberga L., Grosart H.-P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier J., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak J. A., Sharma S., Wain D., Zdorovenov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming // *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. no. 1. P. 1–8. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

References

Arcone S. A., Finnegan D. C., Liu L. Target interaction with stratigraphy beneath shallow, frozen lakes: Quarter-wave resonances within GPR profiles. *Geophysics*. 2006;71(6):K119–K131. doi: 10.1190/1.2358404

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Background levels of chemical elements in the sediments of Lake Imandra. *Transactions of the Kola Science Centre RAS*. 2019;10(4):13–30. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.13-30 (In Russ.)

Jansen J., MacIntyre S., Barrett D. C., Chin Y.-P., Cortés A., Forrest A. L., Hrycik A. R., Martin R., McMeans B. C., Rautio M., Schwefel R. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2021;126(6):e2020JG006237. doi: 10.1029/2020JG006237

Kirillin G., Aslamov I., Kozlov V., Zdorovenov R., Granin N. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: observations from Lake Baikal and a new similarity model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020;24(4):1691–1708. doi: 10.5194/hess-24-1691-2020

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt Ch., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova G., Zdorovenov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a

review. *Aquat. Sci.* 2012;74:659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Lachhab A., Booterbaugh A., Beren M. Bathymetry and sediment accumulation of Walker Lake, PA using two GPR antennas in a new integrated method. *J. Environ. Eng. Geophys.* 2015;20(3):245–255. doi: 10.2113/JEEG20.3.245

Lalomov D. A., Glazunov V. V. Establishing the dependence between the salinity and quality factor based on GPR data. *Georesources*. 2017;1(19):69–77. doi: 10.18599/grs.19.1.11 (In Russ.)

Moorman B. J. Ground-penetrating radar applications in paleolimnology. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research*. Springer; 2002. Vol. 1. P. 23–47. doi: 10.1007/0-306-47669-X_3

Rodionov A. I., Nikolaeva S. B., Ryazantsev P. A. Evaluation of GPR capabilities in the study of seismogenic faulting and deformation in the bottom sediments of Lake Upoloksha (northeast of the Fennoscandian Shield). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(4):1189–1203. doi: 10.5800/GT-2018-9-4-0390 (In Russ.)

Ryazantsev P., Rodionov A., Subetto D. Waterborne GPR mapping of stratigraphic boundaries and turbidite sediments beneath the bottom of Lake Polevskoye, Karelia, NW Russia. *Journal of Paleolimnology*. 2021;66(3):261–277. doi: 10.1007/s10933-021-00205-w

Sambuelli L., Bava S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. *J. Appl. Geophys.* 2012;81:48–56. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.016

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

Starovoitov A. V., Valiullina K. Z., Oshkin A. N., Piatilova A. M. The structure of the sedimentary cover in freshwater lakes of the Kindo Peninsula near the White Sea Biological station of Moscow state university according to data of ground penetration radar and boring. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2019;(6):87–98. doi: 10.33623/0579-9406-2019-6-87-98 (In Russ.)

Vladov M. L., Starovoitov A. V. Introduction to GPR. Moscow State University; 2004. 153 p. (In Russ.)

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G., Bansal Sh., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Erina O., Fedorova I., Fischer J. M., Grinberga L., Grosart H.-P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier J., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak J. A., Sharma S., Wain D., Zdorovenov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nat. Commun.* 2022;13(1):1–8. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

Поступила в редакцию / received: 02.08.2023; принята к публикации / accepted: 13.09.2023.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Новикова Юлия Сергеевна

инженер-исследователь лаборатории географии
и гидрологии

e-mail: NovYuliana@gmail.com

Рязанцев Павел Александрович

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: chthonian@yandex.ru

Дворников Юрий Александрович

канд. геол.-мин. наук, младший научный сотрудник,
доцент агроинженерного департамента АТИ РУДН;
научный сотрудник ИФА РАН

e-mail: ydvornikow@gmail.com

Двоеглазова Надежда Вадимовна

аспирант БФУ им. И. Канта; старший лаборант
лаборатории прибрежных систем Атлантического
отделения ИО РАН

e-mail: nadya2eyes@mail.ru

Толстик Алексей Владимирович

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

e-mail: alexeytolstikov@mail.ru

Игнатьева Мария Николаевна

e-mail: mariyaignatieva@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Novikova, Iuliia

Research Engineer, Laboratory of Geography and Hydrology

Ryazantsev, Pavel

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

Dvornikov, Yury

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Junior Researcher,
Assistant Professor at the Agroengineering Department,
Agrarian-Technological Institute, RUDN University,
Researcher at the IAP RAS

Dvoeglazova, Nadezhda

Doctoral Student at Immanuel Kant Baltic Federal University;
Senior Assistant at the Laboratory of Coastal Systems Study,
Atlantic Branch of IO RAS

Tolstikov, Alexey

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

Ignatieva, Maria

УДК 502.51:504.5-036.5 (282.247.211)

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АКВАТОРИИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ЧАСТИЦАМИ МИКРОПЛАСТИКА

**М. Б. Зобков¹, Н. М. Калинкина¹, В. В. Ковалевский²,
А. В. Багаев³, Н. А. Белкина¹, Н. В. Кулик¹, М. В. Зобкова¹,
Т. А. Ефремова¹, Н. Е. Галахина^{1*}, Н. А. Ефременко¹**

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

² Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11,
Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

³ ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН» (ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия,
299011)

В рамках проекта РФФИ выполнено междисциплинарное исследование загрязнения микропластиком (МП, размер от 0,2 до 5,0 мм) акватории Онежского озера. Ставилась задача оценить современное состояние этого крупного водного объекта в плане загрязнения частицами синтетических полимеров и ассоциированными с ними тяжелыми металлами, идентифицировать источники и зоны аккумуляции микропластика в озере, выявить закономерности его накопления и транспорта, а также возможные экологические риски такого загрязнения. В статье приведены обзор и обобщение полученных результатов. На основе сезонных гидрохимических данных 2019–2021 гг. определено современное состояние озера и установлена степень его загрязнения МП, тяжелыми металлами и другими химическими веществами. Наибольшее содержание МП обнаружено в воде и донных отложениях вершинной части Кондопожской губы, принимающей сточные воды Кондопожского ЦБК. Установлено активное аккумулятивное МП в донных осадках Онежского озера, содержание которого примерно в 2 раза выше по сравнению с Балтийским морем. Выявлены пространственные и сезонные закономерности в распределении МП в водном столбе Онежского озера. Установлено, что в условиях современного уровня загрязнения литорали Онежского озера частицами МП неправильной формы и размером около 100 мкм маловероятно их негативное действие на популяцию инвазивного вида, байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus*. С помощью SEM-EDS и рамановской спектроскопии выявлен механизм минералогической деструкции пластику, определяемый кристаллизацией и ростом микроминералов, что приводит к локальным разрывам пластика и ускорению процессов его деструкции. Разработаны методики фракционирования частиц МП и десорбции металлов с поверхности частиц МП, позволившие получить сопоставимые и воспроизводимые результаты анализа содержания металлов на их поверхности. Впервые предложены модель генерации МП из набора макрофрагментов за счет стохастического разрушения и модель

фильтрации трехмерных фрагментов МП на сетке. Результаты моделирования хорошо согласуются с соотношениями, полученными в результате натуральных экспериментов. Выявленная зависимость может быть использована для корректировки наблюдаемых в природе уровней МП в зависимости от размера ячеек сети, применяемой при отборе проб.

Ключевые слова: микропластик; тяжелые металлы; химический состав воды; загрязнение; вода; донные отложения; рамановская спектроскопия; микро-ИК-фурье-спектроскопия; сорбция; разрушение микропластика; оценка опасности; амфиподы

Для цитирования: Зобков М. Б., Калинин Н. М., Ковалевский В. В., Багаев А. В., Белкина Н. А., Кулик Н. В., Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Галахина Н. Е., Ефременко Н. А. Результаты междисциплинарных исследований загрязнения акватории Онежского озера частицами микропластика // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 32–52. doi: 10.17076/lim1707

Финансирование. Статья подготовлена за счет средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН). Исследования выполнены в 2019–2021 гг. при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-17-00035).

**M. B. Zobkov¹, N. M. Kalinkina¹, V. V. Kovalevski², A. V. Bagaev³, N. A. Belkina¹, N. V. Kulik¹, M. V. Zobkova¹, T. A. Efremova¹, N. E. Galakhina^{1*}, N. A. Efremenko¹.
RESULTS OF INTERDISCIPLINARY STUDIES OF THE CONTAMINATION OF LAKE ONEGO WATER AREA BY MICROPLASTIC PARTICLES**

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

² Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

³ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences (2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia)

An interdisciplinary study of microplastic (MP) contamination in the water area of Lake Onego was conducted within a project funded by the Russian Science Foundation. The aim of the project was to assess the current state of this large water body, specifically its contamination with synthetic polymer particles and the associated heavy metals, to identify the sources and areas of MP accumulation, patterns in its sedimentation and transport, and to conduct a hazard assessment of this pollution. The article provides an overview and a summary of the obtained results. Based on seasonal hydrochemical data for 2019–2021, the current state of the lake was identified and the degree of its contamination with microplastics, heavy metals, and other chemicals was determined. The highest MP content was found in the water and in the bottom sediments of the upper, most heavily contaminated, part of the Kondopoga Bay, where wastewater from the Kondopoga Pulp and Paper Mill enters the lake. Active accumulation of MP was detected in the bottom sediments of Lake Onego, its content being about twice that of the Baltic Sea. Spatial and seasonal patterns of MP distribution in the water column of Lake Onego were revealed. It has been established that with the current level of Lake Onego littoral area contamination by irregularly shaped MP particles sized about 100 microns, their negative impact on the population of invasive species, Baikal amphipod *Gmelinoides fasciatus*, is unlikely. Having applied SEM-EDS and Raman spectroscopy, we revealed the mechanism for mineralogical destruction of plastics driven by the crystallization and growth of microminerals, which leads to local ruptures of the plastic and accelerates its destruction. Methods for fractionation of MP particles and desorption of metals from their surface have been developed, making it possible to obtain comparable and reproducible results when analyzing the metal content on their surface. For the first time, models were suggested to simulate microplastic generation from a set of macrofragments through stochastic destruction and filtering of three-dimensional microplastic fragments on a grid. The simulation results are in good agreement with the ratios obtained during field experiments. The revealed relationships can be used to adjust the detected levels of microplastics in the nature depending on the mesh size of the net used in sampling.

Keywords: microplastic; heavy metals; water chemical composition; contamination; water; bottom sediments; Raman spectroscopy; micro-IR-Fourier spectroscopy; sorption; destruction of microplastics; hazard assessment; amphipods

For citation: Zobkov M. B., Kalinkina N. M., Kovalevski V. V., Bagaev A. V., Belkina N. A., Kulik N. V., Zobkova M. V., Efremova T. A., Galakhina N. E., Efremenko N. A. Results of interdisciplinary studies of the contamination of Lake Onego water area by microplastic particles. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 32–52. doi: 10.17076/lim1707

Funding. The article was prepared using federal budget funding under state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS). The studies were carried out in 2019–2021 with financing from the Russian Science Foundation (project #19-17-00035).

Введение

Загрязнение окружающей среды синтетическими полимерными материалами находится в одном ряду с такими глобальными проблемами современности, как изменение климата, закисление океана и разрушение озонового слоя [Amaral-Zettler et al., 2015]. Из-за длительного разложения синтетических полимеров особое беспокойство вызывает загрязнение водной среды этими материалами, которые напрямую влияют на водных животных, вызывая их гибель из-за проглатывания или запутывания [Gregory, 2009]. Кроме того, плавающий пластиковый мусор, остающийся долгое время на поверхности воды, способствует миграции и распространению биоинвазий. В результате нахождения в окружающей среде пластиковые изделия постепенно разрушаются с образованием более мелких частиц, получивших название «микропластик» (МП) [Moore et al., 2001; Andrady, 2011]. До сих пор нет единого мнения, какого размера частицы следует относить к микропластику, однако в большинстве случаев под этим термином понимают частицы размером менее 5 мм [Andrady, 2011; UNEP..., 2015]. Загрязнение водной среды МП вызывает особое опасение ввиду его способности сорбировать на своей поверхности различные загрязняющие вещества, проникать в тела водных организмов и переноситься на большие расстояния. Активное изучение воздействия МП на водную среду началось около 20 лет назад. В настоящий момент активно исследуется загрязнение океанов и морей частицами МП, с каждым годом появляется все больше информации о содержании этих частиц и в водах суши, вместе с тем большинство работ сосредоточено непосредственно на количественной оценке загрязнения вод и донных осадков МП. Поэтому, несмотря на большой объем полученного при

исследованиях фактического материала и наличие научных публикаций, касающихся этой проблемы, экологическая опасность и отдаленные последствия загрязнения вод частицами МП остаются не до конца ясны.

Поступление МП в водные объекты происходит в процессе разрушения пластиковых изделий на водосборе, с коммунально-бытовыми сточными водами в результате применения населением косметических средств, содержащих пластиковые микрогранулы (различные скрабы, пасты и т. д.) [Fendall, Sewell, 2009], и при повседневной стирке одежды, которая в основном состоит из полимерных волокон. Так, было обнаружено, что при стирке только одного синтетического изделия образуется до 1900 волокон [Browne et al., 2011]. На настоящий момент синтетические волокна являются наиболее часто встречающимся видом пластикового загрязнения в водной среде [Browne et al., 2011; Dubaish, Liebezeit, 2013]. Современные очистные сооружения позволяют существенно уменьшить поступление МП со сточными водами и сократить число сбрасываемых частиц на 95–99 % [Magnusson, Norén, 2014; Talvitie et al., 2017]. Вместе с тем проведенное в 2014 г. сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН обследование очистных сооружений, расположенных на водосборе Онежского озера, показало [Лозовик и др., 2016], что две трети из них фактически не функционируют и сточные воды поступают в озеро без очистки.

В настоящее время установлены факты обнаружения повышенных концентраций тяжелых металлов (ТМ) на частицах пластика, находившихся в природной среде [Ashton et al., 2010]. Установлено, что они могут многократно превышать содержание, наблюдаемое в окружающей их водной среде [Brenneke et al., 2016]. Однако методика подобных исследований не унифицирована, ограниченная выборка изученных акваторий не позволяет говорить о каких-либо

закономерностях и тем более зависимости от условий окружающей среды.

В этой связи актуальной задачей является оценка уровня и потенциальной опасности загрязнения окружающей среды полимерными материалами. Она осложняется тем, что в настоящее время не существует ни одного стандартизированного метода определения содержания МП, хотя имеются рекомендации по его разработке [International..., 2020]. Различными организациями предложены протоколы, например рекомендации национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) [Masura et al., 2015], однако зачастую они разрабатываются для локального использования или применения к определенным видам сред и условий, и в каждом конкретном случае возникает необходимость их адаптации под задачи отдельного исследования [Dris et al., 2015; Zobkov, Esiukova, 2018], что затрудняет сравнение результатов, полученных в разных географических районах.

Крупные озера содержат около 68 % запаса жидкой пресной воды на планете, но в то же время представляют собой крайне уязвимый ресурс в связи с ее активным использованием в экономике и социальной сфере [Beeton, 2002]. Для комплексного изучения загрязнения второго по величине озера Европы – Онежского – в рамках проекта Российского научного фонда «Распространение микропластика и ассоциированных с ними тяжелых металлов и их соединений в крупных водных объектах суши (на примере Онежского озера)» проведено междисциплинарное исследование загрязнения водной среды новым типом загрязняющих веществ – микропластиком. Требовалось оценить современное состояние этого крупного водного объекта относительно загрязнения частицами синтетических полимеров и ассоциированными с ними ТМ, идентифицировать источники и зоны аккумуляции микропластика в озере, выявить закономерности его накопления и транспорта, а также выявить возможные экологические риски такого загрязнения.

В данной статье представлен обзор основных результатов, полученных во время реализации проекта по следующим взаимосвязанным направлениям:

- Разработка новых методов анализа содержания МП в донных осадках [Zobkov et al., 2020б];
- Определение уровня загрязнения водной среды МП, ТМ и другими химическими веществами [Zobkov et al., 2020а; Galakhina et al., 2022];

- Изучение взаимодействия ТМ и МП в условиях бореальных водных объектов [Kulik, Efremenko, 2021; Kulik et al., 2023];
- Исследование влияния МП на водную биоту [Kalinkina et al., 2022];
- Изучение химического состава частиц МП и процессов их деструкции в водной среде инструментальными методами анализа (рамановская спектроскопия, ИК-фурье-микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, 3D лазерная микроскопия) [Kovalevskii, Zobkov, 2021];
- Математическое моделирование процессов фрагментации полимеров и изучение размерно-частотных распределений МП с целью выявления влияния пробоотборных устройств на наблюдаемые в природе распределения МП по размерам [Bagaev, Zobkov, 2021].

Исследования проведены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Материалы и методы

Онежское озеро – второй по величине водоем в Европе, площадь его водосбора составляет 53 100 км², объем воды – 295 км³, средняя и максимальная глубины – 30 и 120 м соответственно [Онежское..., 2010]. Притоками озера являются 1152 реки, крупнейшие из них, Шуя, Суна и Водла, обеспечивают около 60 % речного стока [Балаганский и др., 2015]. Численность населения на водосборной территории Онежского озера составляет около 412 тыс. человек, при этом большая его часть проживает в городе Петрозаводске (281 тыс. человек) [Росстат..., 2020].

Микропластик может поступать в водоемы как со сточными водами, так и с речным стоком в результате его выноса с водосборной территории, а также образовываться в прибрежной зоне водных объектов в процессе разрушения крупных пластиковых изделий. При реализации проекта помимо определения уровня загрязнения Онежского озера МП проведена оценка современного состояния озера по другим химическим показателям. В этой связи отбор проб на определение содержания МП во время всех полевых работ был совмещен с отбором проб воды на химический анализ. Экспедиционные исследования Онежского озера, его притоков (реки Шуя, Водла, Вытегра, Андома, Неглинка и Лососинка), истока из озера, р. Свирь, а также малых водотоков (реки Нелукса

и Сельгская) и поступающих в них фильтрационных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) и активных илов (АИ) станции биологической очистки г. Петрозаводска (рис. 1) были выполнены в различные сезоны 2019–2021 гг. в период открытой воды с использованием научно-исследовательских судов «Эколог» и «Посейдон»; зимой 2021 г. отбор проб вели с поверхности льда. Всего отобрано 300 проб воды на содержание Na^+ , Cl^- , органического вещества ($\text{C}_{\text{орг}}$, ХПК, ПО, цветность, БПК₅, гумусовые вещества, лигносульфонаты), биогенных элементов ($\text{P}_{\text{мин}}$, $\text{P}_{\text{общ}}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , $\text{N}_{\text{орг}}$), $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Mn , TM , взвешенного вещества, а также электропроводность, pH воды и содержание растворенного кислорода. В пробах малых водотоков помимо вышеперечисленных компонентов было определено содержание Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Si , загрязняющих веществ (фенолы, нефтепродукты, СПАВ) и CO_2 .

За время работы над проектом пробы донных осадков на анализ содержания МП отобраны на 36 станциях. В статье приведена подробная информация о содержании МП в донных осадках на 17 станциях в зонах наибольшего антропогенного влияния. Для определения содержания МП в водном столбе отобрано 129 проб воды в различные гидрологические сезоны 2019–2021 гг., однако к моменту написания статьи обработаны только 18. Кроме того, осуществлялся отбор проб с поверхности воды нейстонной сетью, но так как из них обработан лишь небольшой процент, результаты по ним в настоящую публикацию не вошли.

Отбор проб

Пробы воды на химический анализ отбирали с помощью батометра, фиксировали на борту судна. Пробы для определения ТМ в воде отбирали фторопластовым батометром с тех же горизонтов и консервировали.

Отбор проб воды для анализа содержания МП осуществляли из толщи воды с помощью вертикальной сети с размером ячеи 174 мкм. Размер сети составлял: входное отверстие 50×50 см, длина 2,5 м. При отборе проб сеть опускалась до дна так, чтобы груз не касался донного осадка. Глубину контролировали по эхолоту. Затем сетка равномерно поднималась с помощью бортовой лебедки. Концентрат, образовавшийся в сетке, сливался в стеклянную бутылку с притертой пробкой, после чего сеть несколько раз промывалась снаружи, а фильтрат отводился в бутылку. Контроль внешнего загрязнения на борту судна проводили путем периодического сбора фильтрата, образующегося при промы-

ве сетки снаружи (раз в сутки), с его последующим лабораторным анализом аналогично холостой пробе. Объем профильтрованной воды для формирования одной пробы на различных станциях составлял от 3 до 20 м³ в зависимости от глубины. Всего для отбора 18 проб профильтровано 158 м³ воды.

Пробы донных отложений для определения физико-химических параметров осадка и содержания МП отбирали с помощью дночерпателей (Петерсона и коробчатый дночерпатель Hydrobios). Поверхностный слой осадка толщиной 5 см помещали в чистые полиэтиленовые пакеты со струной и хранили при температуре 4 °С до анализа в лаборатории, где часть пробы массой около 50 г отбирали из общей массы для определения физико-химических параметров осадка, а 400 г – на анализ содержания МП. Гранулометрический состав осадка определен с использованием лазерного анализатора частиц Beckman Coulter LS 13 320.

Анализ проб

Химический анализ проб воды проводился по стандартным методикам [Аналитические..., 2017] в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. Достоверность полученных результатов проверялась путем внутреннего и внешнего контроля. Впервые отбор и определение тяжелых металлов в воде выполнено не только с поверхностного, но и с придонного горизонта Онежского озера. Анализ металлов осуществлен методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) и атомной абсорбцией.

Содержание МП в донных осадках определялось по разработанной в ходе выполнения проекта методике [Zobkov et al., 2020b]. Донные осадки во влажном состоянии подвергали предварительному окислению содержащегося в нем органического вещества путем добавления 50 мл 30% раствора H_2O_2 , что позволяло разрушить устойчивые связи между частицами осадка и пластика. Затем для удаления мелкоалевритовых фракций, мешающих плотностному разделению, осуществлялась фильтрация пробы донных отложений через каскад из трех фильтров с ячейками 333, 174 и 100 мкм соответственно. Эта модификация позволяет удалить из системы мешающую илистую и алевритовую фракции и другие включения размером меньше 100 мкм. Остальные манипуляции с пробой проводили с использованием сетей с размером ячеи 174 мкм. Для плотностного разделения МП и осадка использовали формиат калия (HCOOK , $\rho = 1,5$ г/мл). Эффективность

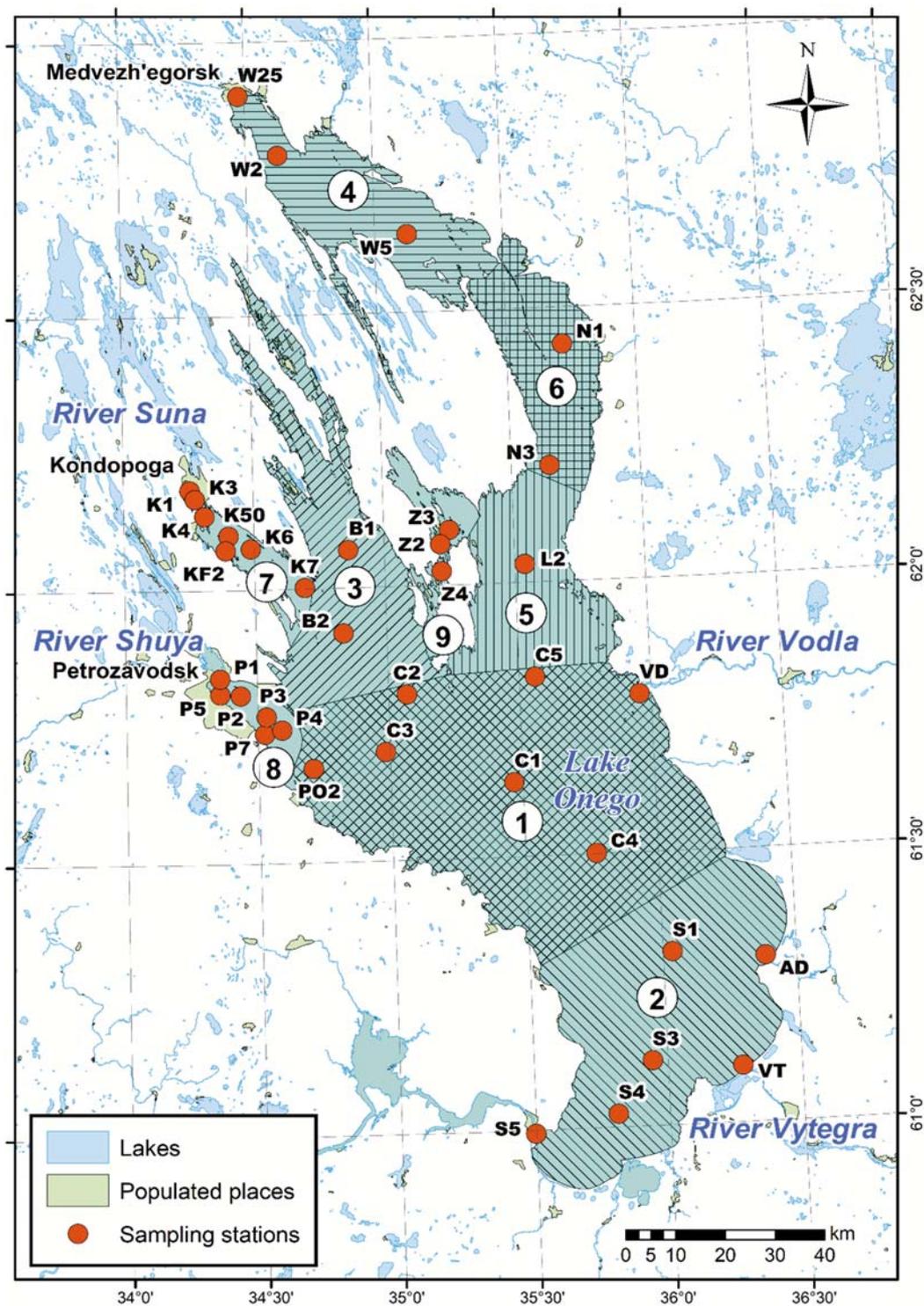


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб воды на химический анализ, содержание МП в воде и донных осадках. Цифрами обозначены лимнические районы Онежского озера: 1 – Центральное Онего; 2 – Южное Онего; 3 – Большое Онего; 4 – Повенецкий залив; 5 – Малое Онего; 6 – Заонежский залив; 7 – Кондопожская губа; 8 – Петрозаводская губа; 9 – Кижские шхеры

Fig. 1. Schematic map of water sampling sites for chemical analysis and microplastic content in water and sediments. Numbers represent limnic regions of Lake Onego: 1 – Central part of the lake (Tsentral'noe Onego); 2 – South Onego (Yuzhnoe Onego); 3 – Large Onego (Bol'shoe Onego); 4 – Povenets Bay (Povenetskii zaliv); 5 – Small Onego (Maloe Onego); 6 – Zaonezhsky Bay (Zaonezhskii zaliv); 7 – Kondopoga Bay (Kondopozhskaya guba); 8 – Petrozavodsk Bay (Petrozavodskaya guba); 9 – Kizhi skerries (Kizhskie shkhery)

выделения искусственных референсных РЕТ частиц (artificial reference particles, ARP) [Zobkov, Esiukova, 2017] составила в среднем $88 \pm 6\%$ ($N = 8$), что практически не уступает эффективности, полученной при использовании $ZnCl_2$ для выделения МП из морских осадков [Zobkov, Esiukova, 2017]. Это позволяет сравнивать результаты, полученные с использованием двух методик. Применение сетей и фильтров с одинаковым размером ячеек 174 мкм для различных природных матриц позволило нам сравнивать наблюдаемые концентрации МП как в воде, так и в донных осадках Онежского озера. Основной проблемой при отборе и лабораторной обработке проб воды является их внешнее загрязнение из окружающей среды, которое может превышать наблюдаемое в пробе и приводить к существенному искажению результатов. Для оценки качества анализа была введена процедура многоступенчатого контроля, включающего следующие этапы:

1. Контроль загрязнения на протяжении всего цикла обработки от отбора до подсчета количества МП путем отбора холостой пробы из вертикальной сети (пробы воды).

2. Контроль при фильтрации проб в судовой лаборатории путем установки холостых фильтров на время экспозиции пробы. Включает этапы анализа от фильтрации пробы до подсчета количества МП (пробы воды).

3. Контроль при окислении и плотностном разделении проб в лаборатории путем установки холостых фильтров на время экспозиции пробы (пробы воды и донных осадков). Включает этапы анализа от окисления пробы до подсчета количества МП.

4. Контроль при подсчете количества МП под микроскопом в пробе путем установки холостых фильтров на время экспозиции пробы (пробы воды и донных осадков).

В условиях стационарной лаборатории для уменьшения внешнего загрязнения пробы работы проводились в ламинарном шкафу. По результатам оценки внешнего загрязнения устанавливался источник его происхождения, который по мере возможности устранялся. Выявленное внешнее загрязнение проб вычиталось из результатов анализа.

Для анализа химического состава частиц МП, извлеченных из природных матриц и использованных в экспериментах, применялись рамановский спектрометр Nicolet Almega XR (Thermo Fisher Scientific, США) и ИК-фурье-микроскоп «МИКРАН-2» со спектрометром ФТ-801 («Симэкс», Россия). Для исследования с помощью рамановской спектрометрии использовался красный лазер с длиной волны

785 нм. Определение состава частиц на микроскопе «МИКРАН-2» проводилось в режиме двойного пропускания и нарушенного полного внутреннего отражения. Полученные спектры подвергались коррекции по базовой линии, удалению шумов, после чего осуществлялся поиск аналогичных спектров по специализированным библиотекам спектров. Совпадение с референсным спектром полимера считалось значимым, если составляло более 70 %.

Для исследования морфологии поверхности полимерных частиц и полуколичественного анализа тяжелых металлов на их поверхности использовался сканирующий электронный микроскоп VEGA II LSH (Tescan, Чехия), укомплектованный энергодисперсионным модулем Oxford INCA Energy350 и детектором SDDX-Act3 (Oxford Instruments, Великобритания).

Постановка экспериментов

Для оценки возможности взаимодействия МП и ТМ проведены лабораторные эксперименты с искусственно измельченными образцами, состаренными в естественных условиях. Образцы (коричневая РЕТ бутылка и новая РЕТ бутылка) измельчались с помощью высокоскоростной мельницы. Для экспериментов путем просеивания и фильтрации отобранась фракция от 0,45 до 100 мкм [Kulík et al., 2023].

Для подготовленных таким образом частиц была оценена сорбционная способность [Rozhkova, Kovalevski, 2019] путем сорбции красителей метанилового желтого (МЖ) и метиленового синего (МС) с сопоставимым размером молекул и противоположным ионным характером: кислотный МЖ и основной МС. Для оценки адсорбционной активности образцов МП по отношению к растворенным в воде красителям проводили адсорбцию МС и МЖ из водных растворов. Концентрацию красителя в растворе определяли с применением рамановской спектроскопии.

Сорбционная способность синтетических полимеров по отношению к различным ТМ оценивалась в воде Онежского озера, отобранной в центральной его части (станция СЗ). В выбранных для эксперимента образцах воды кроме концентрации металлов определены значения рН и цветность. Поскольку содержание металлов в пробах природной воды (кроме железа) достаточно низкое, дополнительно были приготовлены образцы этих проб с добавками исследуемых элементов. Объем добавки подбирали таким образом, чтобы не изменился рН раствора. Полученные растворы до и после экспериментов анализировали на содержание

металлов методом ИСП-МС и методом атомной абсорбции [Kulik et al., 2023].

Лабораторные эксперименты по оценке воздействия частиц МП на водные организмы были выполнены с использованием тест-объекта *Gmelinoides fasciatus* Stebbing (Amphipoda), вселенца в Онежское озеро из оз. Байкал. Исследование возможного поглощения МП рачками *G. fasciatus* проведено в четырех сериях экспериментов с частицами сополимера полистирола неправильной формы (ABS, искусственно измельченные). В каждой серии использованы частицы одного из размерных классов (<50; 50–100; 100–250; >250 мкм) [Kalinkina et al., 2022]. Всего в экспериментах использовано 144 экз. рачков. По окончании эксперимента (5 суток) рачки изымались из среды, подвергались разложению в перекиси водорода, после чего проводилось определение размера и количества частиц МП, проглоченных организмами в каждой повторности опыта.

Для описания процессов фрагментации МП использовались наблюдаемые в природе размерно-частотные распределения частиц МП, теоретические представления о фрактальной размерности распределений и методы математического моделирования.

Результаты и обсуждение

Химический состав воды Онежского озера и некоторых его притоков, содержание тяжелых металлов

Анализ сезонных гидрохимических данных за 2019–2021 гг. позволил установить, что пелагиаль Онежского озера (Центральная и Южная части, Заонежский залив, Большое и Малое Онего) сохраняет высокое качество воды, которое существенно не изменилось за последние несколько десятилетий [Galakhina et al., 2022]. Основные источники загрязнения Онежского озера сосредоточены в его крупных заливах (Петрозаводская и Кондопожская губы), но, благодаря разбавлению водных масс и трансформации химических веществ, в открытой части озера их влияние не проявляется. В то же время признаки эвтрофирования воды пелагической части озера, а также Петрозаводской и Кондопожской губ определяются по снижению соотношения $N_{\text{мин}} : P_{\text{общ}}$ за последние тридцать лет. Несмотря на то что на Петрозаводскую губу влияют два мощных фактора (сток р. Шуя, одного из крупнейших притоков с высокой степенью урбанизации водосбора, и сточные воды г. Петрозаводска), интенсивный водообмен губы с открытой частью озера обеспечивает

приемлемое качество воды в заливе в осенне-летний период, однако его ухудшение наблюдается зимой и весной. Кондопожская губа является наиболее загрязненным районом озера, подверженным влиянию Кондопожского ЦБК и форелевых хозяйств. В центральной ее части, где расположены форелевые хозяйства, наблюдается тенденция увеличения содержания $P_{\text{общ}}$. Сток р. Суны способствует улучшению качества воды в вершине губы, одновременно усиливая перенос загрязняющих веществ в открытую часть озера. В Повенецком заливе по сравнению с предыдущими исследованиями наблюдаются процессы олиготрофизации.

Современное содержание металлов в воде поверхностного и придонного горизонтов Онежского озера по таким элементам, как Zn, Pb, Cd и Ni, находится существенно ниже их ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Более высокие концентрации, превышающие ПДК, отмечены для Cu и в ряде случаев для Fe и Mn, что связано с региональными особенностями поверхностных вод Карелии [Лозовик, 2015]. Содержание Pb в озерной воде на порядок ниже, чем Zn. Пространственному распределению большинства рассмотренных металлов по акватории озера свойственна значительная неоднородность, однако концентрации Pb и Cr по акватории озера изменяются незначительно.

Концентрации Fe, Mn и Zn в воде Онежского озера намного ниже их региональных фоновых величин [Лозовик, Платонов, 2005; Лозовик, 2015], а также ниже их содержания во всех источниках формирования химического состава воды озера, что может быть связано с процессами их трансформации в озере и захоронением в донных отложениях [Сабылина, Рыжаков, 2007; Лозовик и др., 2020]. Для Кондопожской и Петрозаводской губ, принимающих промышленные и бытовые сточные воды крупных промцентров, характерно повышенное содержание металлов по сравнению с другими районами озера, однако их концентрация не превышает ПДК. В процессе исследований не выявлено значимой разницы в содержании металлов в приустьевых зонах рек и в воде принимающих их заливов. Содержание ТМ в воде устьев рек сопоставимо с результатами предыдущих исследований [Сабылина, Рыжаков, 2007; Сабылина, 2015; Лозовик и др., 2020].

Анализ воздействия полигонов захоронения ТБО и АИ на химический состав воды малых водотоков позволил выявить основные компоненты-маркеры, показывающие влияние стоков этих полигонов на качество воды рек Нелукса и Сельгская [Зобков и др., 2021a]. В указанных реках выявлено значительное превышение ПДК

по Fe, Mn, Zn и Cu. На основе водного баланса полигонов определен объем эмиссии химических веществ с их территории, а также их вклад в вынос этих веществ с реками в Онежское озеро. Так, на долю полигона АИ приходится около 20 % всех выносимых р. Сельгской взвешенных веществ, 17 % органических легкоокисляемых веществ, 14 % азота нитритного, 3,2 % $N_{орг}$ и 10 % $N_{общ}$. При этом весь аммонийный азот, выносимый рекой, поступает с полигона. Наиболее значимый вклад в вынос химических веществ с водами р. Нелукса полигон ТБО вносит по NH_4^+ (12 %), $N_{общ}$ (2,0 %), Cl^- (2,5 %) и Na^+ (1,2 %). За счет небольшого объема поступления сточных вод с полигона ТБО загрязнение р. Нелукса в настоящий момент незначительное, и на всем протяжении ее воды относятся к «слабозагрязненным». Основной сток загрязненных вод поступает в р. Сельгскую, которая по критерию УКИЗВ [РД 52.24.643-2002] классифицируется как «грязная» ниже точки впадения стоков полигона АИ.

Содержание микропластика в Онежском озере

Микропластик выявлен во всех проанализированных пробах донных осадков Онежского озера, в среднем его содержание составляло $989,1 \pm 644,1$ ($n = 36$, $P = 0,95$) пластиковых частиц (>174 мкм) на кг сырого веса осадка (шт./кг), или $6667,1 \pm 4326,8$ ($n = 36$, $P = 0,95$) частиц на кг сухого веса осадка (шт./кг СВ). Внешнее загрязнение по результатам анализа 12 холостых проб в среднем составило 55 ± 12 ($p = 0,95$) частиц МП на пробу донных отложений. Внутренний контроль показал, что извлекаемость МП из донных осадков в среднем составила 93 ± 2 % ($n = 36$, $p = 0,95$).

Минимальное содержание МП установлено в донных осадках на станции W2 в Повенецком заливе ($234,8$ шт./кг СВ) и на станциях L1811 и L1812 в Малом Онего ($766,5$ и $380,0$ шт./кг СВ соответственно). Максимальное его содержание обнаружено на станциях K4 и K1 в вершинной части Кондопожской губы – 33142 и 52107 шт./кг СВ соответственно (рис. 2). Выявлено, что фрагменты пленки и гранулы концентрируются возле источников их поступления, а волокна накапливаются в крупных зонах седиментации с глубинами более 20 м и в пелагиали озера [Zobkov et al., 2020a].

Полученные результаты в среднем оказались довольно близкими к содержанию МП в донных осадках в урбанизированных областях мира: в бассейне р. Атояк в Мексике (1133 шт./кг СВ (Atoyac River), 1633 шт./кг СВ (Zahuapan River),

размер МП > 1,2 мкм [Shruti et al., 2019]) и в р. Жемчужной в Китае (1669 шт./кг СВ, размер МП > 20 мкм [Lin et al., 2018]). В донных осадках Онежского озера они были вдвое выше по сравнению с оз. Юэцзинь в Китае (867 шт./кг СВ, размер МП > 1,2 мкм [Wen et al., 2018]), прибрежными осадками оз. Онтарио в Канаде (760 шт./кг СВ, размер МП > 63 мкм [Ballent et al., 2016]) и речными осадками в городе Шанхай, Китай (802 шт./кг СВ, размер МП > 1,0 мкм) [Peng et al., 2018]. И как минимум в два раза выше, чем в донных осадках Балтийского моря (876 шт./кг СВ, размер МП > 174 мкм [Esiukova et al., 2020]).

Высокое содержание МП в донных осадках Онежского озера подчеркивает важную роль больших озер в процессах его накопления в донных осадках водных объектов суши. Статистически более высокое содержание МП в Онежском озере по сравнению с Балтийским морем указывает на большую скорость его накопления в этом пресноводном водоеме по сравнению с морем, несмотря на значительно меньшую плотность населения на водосборе озера, интенсивность хозяйственной деятельности и урбанизации [Зобков и др., 2021б].

Внешнее загрязнение проб из водного столба было на 98 % представлено волокнами. По результатам анализа оно составило около 197 шт./пробу или 34 шт./м³, что существенно ниже, чем содержание МП в пробах. Максимальное количество МП обнаружено в воде Кондопожской губы в районе выпуска сточных вод Кондопожского промцентра (ст. K3), где оно достигало 3680 шт./м³. При этом на глубоководной ст. K6 в центральной части губы наблюдалась минимальная концентрация МП (78 шт./м³).

Распределение частиц МП в водном столбе Кондопожской губы и Большом Онего различалось по сезонам. Так, весной 2019 г. среднее содержание МП без учета экстремальных значений составило 449 (SD¹ 322) шт./м³. Весной 2020 г. в центральной части озера и Кондопожской губе содержание МП в воде было выше по сравнению с 2019 г. В среднем, без учета экстремальных значений, оно составило 2456 (SD 1177) шт./м³. Экстремально высокое количество МП обнаружено на станции B2, где оно превышало 21 тыс. шт./м³. В Кондопожской губе наибольшее содержание МП наблюдалось на станции K3, рядом с выпуском сточных вод. Летом 2020 г. содержание МП в водном столбе изученных районов было существенно

¹ SD – standard deviation, стандартное отклонение.

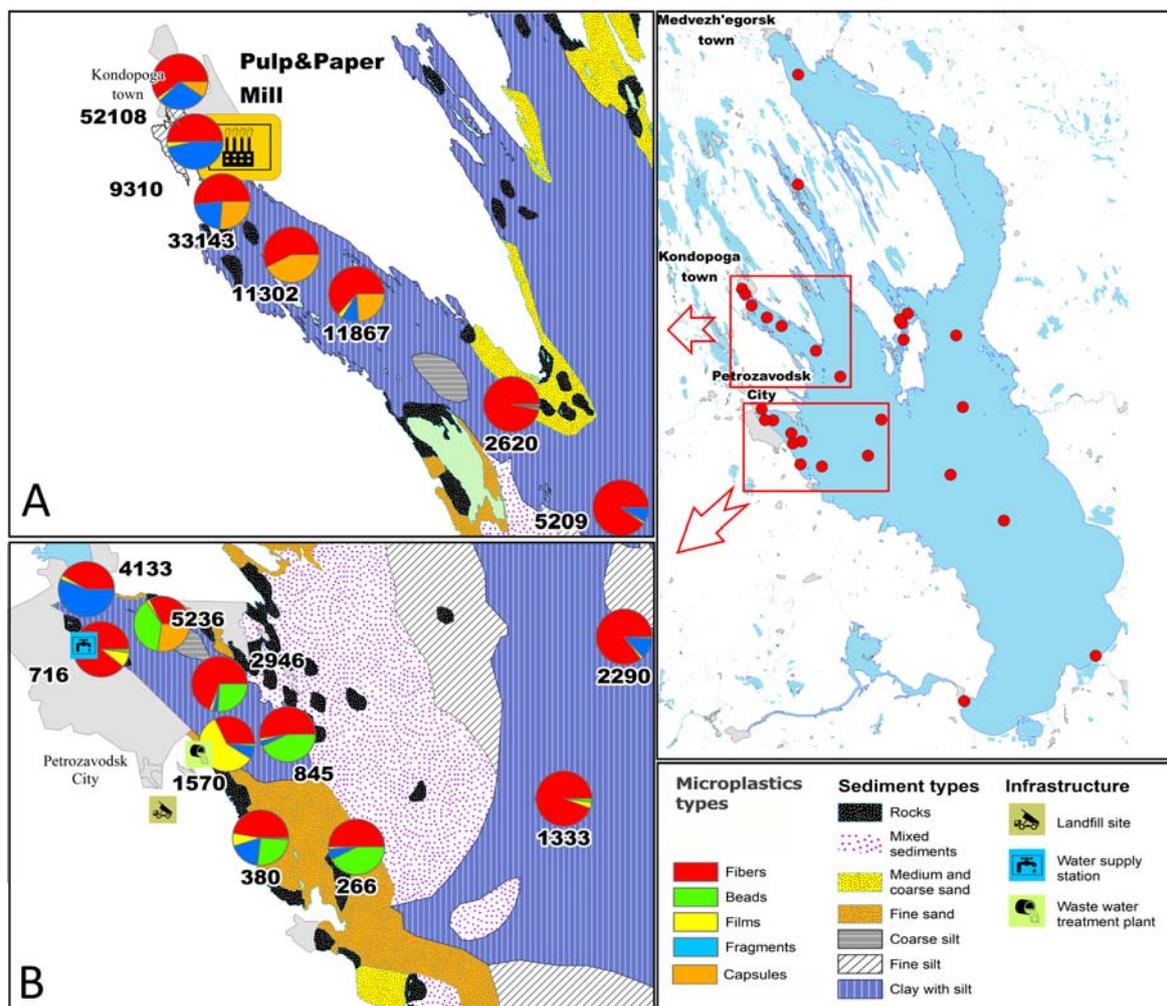


Рис. 2. Содержание микропластика в донных осадках (шт./кг СВ) и типы грунтов в некоторых районах Онежского озера [Zobkov et al., 2021б]. А – Петрозаводская губа и Центральное Онего; В – Кондопожская губа

Fig. 2. Microplastic content (pcs/kg DW) in different types of bottom sediments of some areas of Lake Onego [Zobkov et al., 2021б]. А – Petrozavodsk Bay and Central Onego; В – Kondopoga Bay

ниже, чем наблюдалось ранее в весенние периоды. Максимальное его количество обнаружено опять же на ст. КЗ в вершине Кондопожской губы, где достигало 820 шт./м³. В среднем, без учета экстремальных значений, в губе оно составило 109 (SD 52) шт./м³, что сопоставимо с данными, полученными ранее в весенний период для Балтийского моря в зоне влияния пресных вод Балтийского канала с использованием ячеи аналогичного размера [Zobkov et al., 2019], где в среднем по объему оно составило 79,1 шт./м³. В другие сезоны содержание МП в водном столбе Онежского озера было существенно выше, чем в Балтийском море, что согласуется с ранее полученными выводами о высоком содержании МП в донных осадках озера по сравнению с Балтийским морем [Zobkov et al., 2020а].

Во всех водных пробах преобладали волокна, в среднем их количество составило 99 % от общего. В донных отложениях МП также в основном был представлен волокнами, но их доля составила всего 50–60 %. В целом закономерности распределения МП, содержащегося в водном столбе Кондопожской губы (рис. 3), соответствуют тенденциям, выявленным для донных осадков этого залива, где максимальное количество МП было также обнаружено в вершинной его части (ст. К1, до 52 тыс. шт./кг СВ).

Химический состав частиц микропластика по данным рамановской и микро-ИК-фурье-спектроскопии

Рамановская спектроскопия позволила успешно идентифицировать в донных осад-

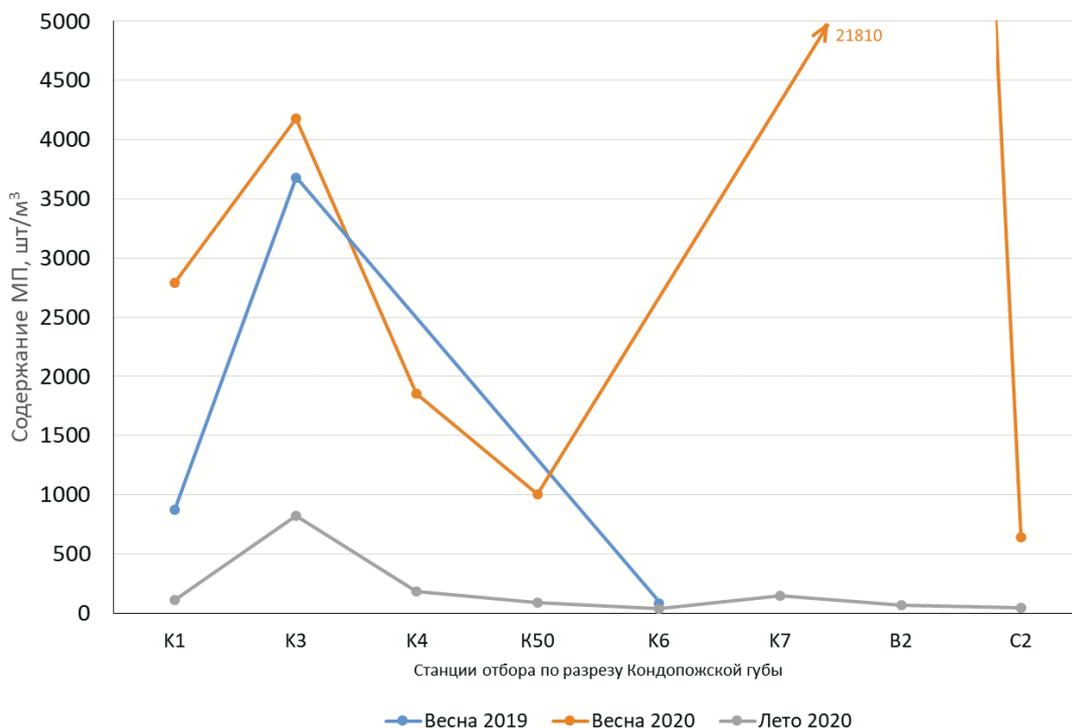


Рис. 3. Содержание волокон (шт./м³) в водном столбе Онежского озера по разрезу K1-B2 в различные сезоны

Fig. 3. Fibers (pcs/m³) in the water column of Lake Onego along the vertical profile K1-B2 in different seasons

ках Онежского озера 54 частицы МП, или 74 % от исследованных образцов. Всего в осадках обнаружено 16 различных классов полимеров. Наиболее распространенным полимером является полиэтилен и его сополимеры – 17 % от общего количества, на втором месте акрил и поликарбонат – по 15 %, остальные – менее 15 % каждый (рис. 4). При этом 72 % из идентифицированных МП составляют полимеры, плотность которых выше плотности воды (PC, PET, AC, PS, PTFE и др.), что указывает на их преимущественное накопление в озерах и подтверждает ранее полученный вывод для Петрозаводской губы [Zobkov et al., 2020a].

В воде Онежского озера с помощью рамановской и ИК-фурье-спектроскопии успешно идентифицированы 95 образцов МП (81 %). В воде преобладали синтетические полимеры, идентифицированные по присутствию различных синтетических добавок (пластификаторы, стабилизаторы и др., 30 % от общего количества идентифицированных частиц) (рис. 4). На втором месте находились полипропилен PP и PET, на каждый из которых приходилось по 12 %. Доля полимеров естественного происхождения составила 12 %.

В воде Онежского озера обнаружено существенно больше полипропилена, чем в его донных

осадках; доля PET и PVC в воде также была существенно выше. Вместе с тем PE в воде было более чем в 2 раза ниже, чем в осадках. В обеих средах наблюдалось близкое содержание полиамида (нейлона, PA), модифицированной целлюлозы (MCE) и природных полимеров (NP).

Исследование частиц МП с применением рамановской и ИК-фурье-спектроскопии позволило оценить долю синтетических полимеров в общем пуле обнаруженных частиц, которая в целом составила 90 %.

Морфология частиц микропластика

Электронная сканирующая микроскопия позволила установить тонкие детали морфологического строения полимеров, а EDS-микроанализ – получить информацию об относительном содержании химических элементов в поверхностном слое полимеров.

Морфологическое строение полимеров характеризуется наличием микро- и наноразмерных слоев, пор, трещин, причем их количество зависит от типа пластика и степени его деструкции (рис. 5). На поверхности пластиков, как волокон, так и частиц, выделенных из водных проб, обнаружены диатомовые водоросли *Aulacoseira islandica*, *Tabellaria flocculosa*,

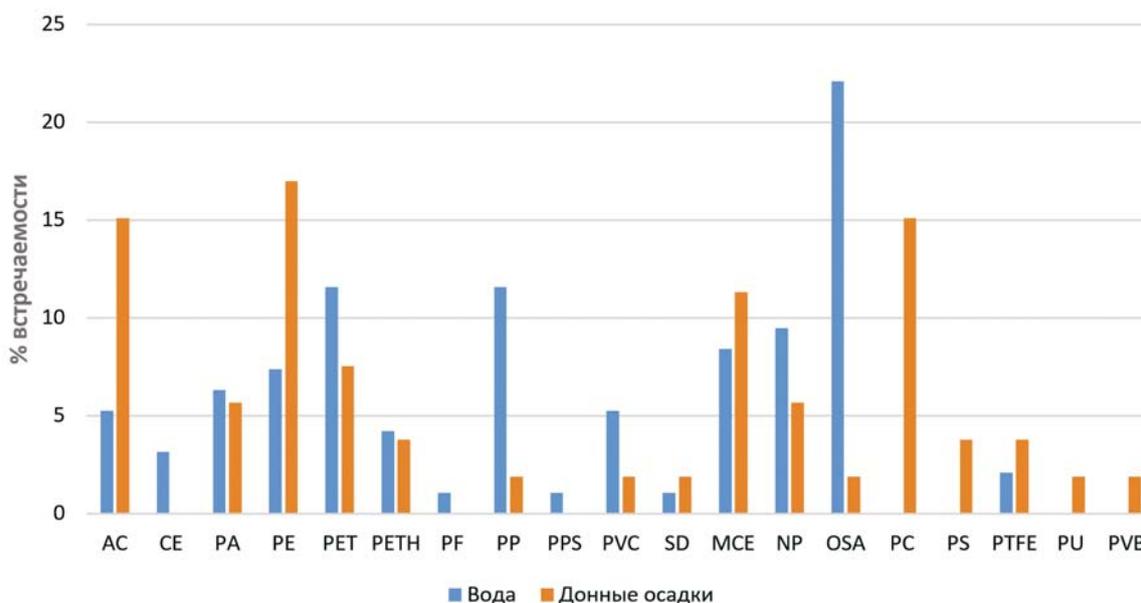


Рис. 4. Процент встречаемости различных полимеров и других веществ в воде и донных осадках Онежского озера. PE – полиэтилен и его сополимеры, PET – полиэтилентерефталат, PP – полипропилен и его сополимеры, PVC – поливинилхлорид и его сополимеры, PS – полистирол, PA – полиамид, PU – полиуретан, PC – поликарбонат, AC – акрил, PTFE – политетрафторэтил и другие фторопласты, PVB – поливинилбутираль, SD – синтетические красители, OSA – другие синтетические добавки, PETH – алкидные (полиэфирные) смолы, краски и клеи на их основе, PF – фенол-формальдегидные смолы, PPS – полифениленсульфид, MCE – модифицированная целлюлоза, CE – целлюлоза, NP – другие органические материалы природного происхождения

Fig. 4. Relative abundance of different polymer types in water and sediments of Lake Onego. PE – polyethylene and co-polymers, PET – polyethyleneterephthalate, PP – polypropylene and co-polymers, PVC – polyvinylchloride and co-polymers, PS – polystyrol, PA – polyamide, PU – polyurethane, PC – polycarbonate, AC – acrylic, PTFE – polytetrafluoroethylene and other fluoropolymers, PVB – polyvinilbutiral, SD – synthetic dies, OSA – other synthetic additives, PETH – polyester resins, dies and glues, PF – phenol formaldehyde resins, PPS – polyphenylene sulfide, MCE – artificially modified cellulose, CE – cellulose, NP – other natural polymers

Aulacoseira sp. и др. [Kovalevski, Zobkov, 2021]. На поверхности МП, выделенных из донных отложений, диатомеи не обнаружены. Минеральные включения выявлены фактически на всех микропластиках. Элементный состав некоторых из них характерен для красителей, например Ва-содержащих. Однако в более чем 10 образцах, отобранных из водных проб и донных отложений, выявлены минеральные зерна и агрегаты со следами огранки, свидетельствующие об их непосредственной кристаллизации в пластике [Kovalevski, Zobkov, 2021]. Минеральные включения имеют комплексный элементный состав, в который входит Са, и расположены в порах и трещинах, которые, исходя из их морфологии, образовались при кристаллизации и росте минеральных включений. Данный фактор, который нами отмечен ранее и назван минералогическим фактором деструкции пластика, обнаружен в волокнах и частицах различных пластиков, как из водных проб, так и из донных отложений Онежского озера (рис. 5, D).

Кроме того, установлено, что различные пластики в различной степени являются носителями ТМ [Kovalevski, Zobkov, 2021]. Например, на поверхности частиц полиэтилена помимо предполагаемых зерен красителя обнаружен только Fe, тогда как на поверхности волокон и частиц полипропилена, полиакрилонитрила, нейлона 6 и др. – широкий спектр таких тяжелых металлов, как Fe, Cr, Ni, Mn, Zn, Sn, Pb.

Размерный ряд микропластика и его моделирование

В процессе работы над проектом выдвинута гипотеза о возможности применения теории фрактальной размерности для описания распределений микропластика по размерам. В развитие идеи о фрактальном подобию, характерном для разных размерных классов МП в природе, была разработана математическая модель стохастического разрушения макрочастиц пластика до размера микропластика

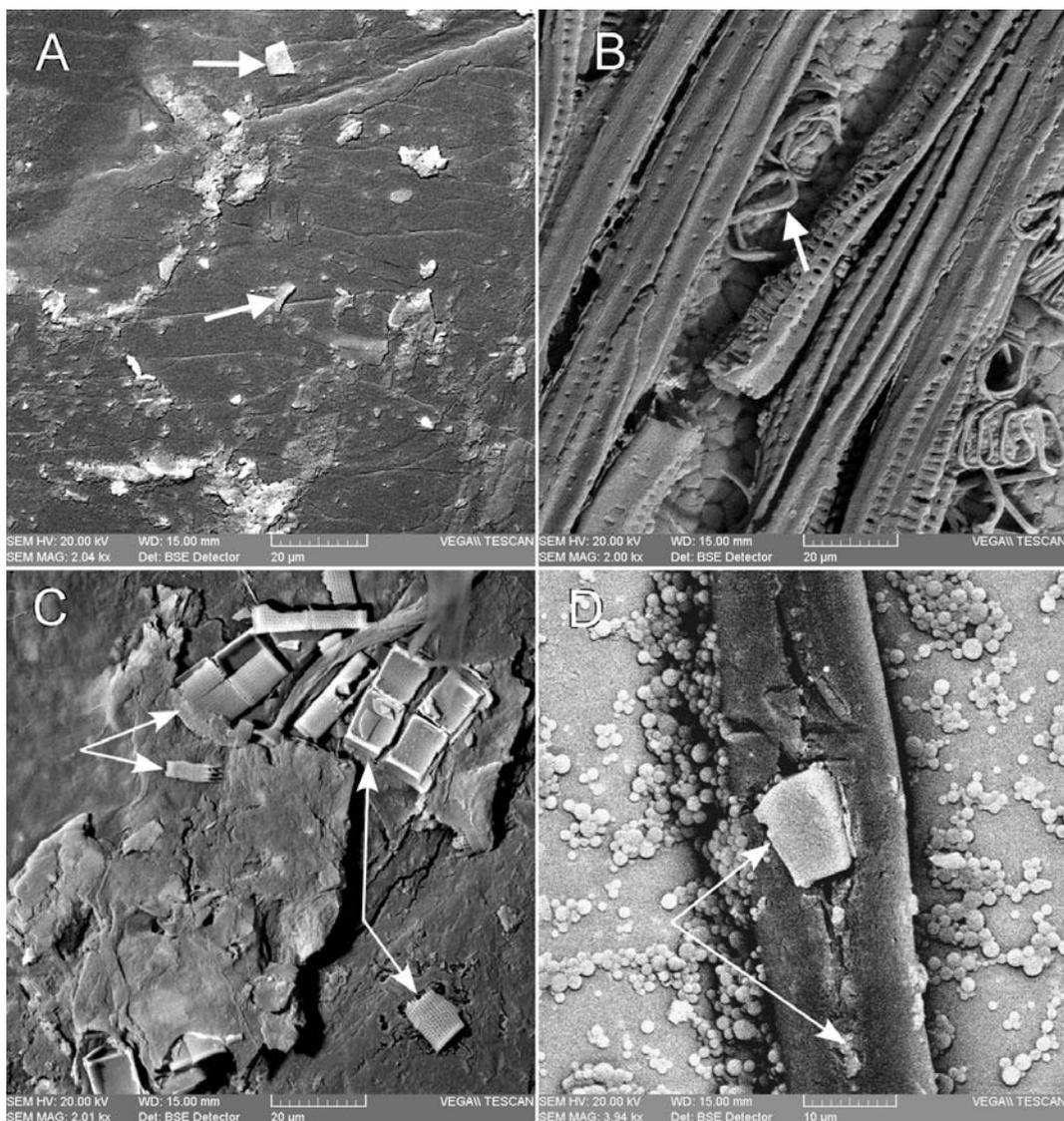


Рис. 5. SEM-изображения, иллюстрирующие различные механизмы разрушения микропластика (показаны стрелками): А – локальное отслоение частиц нанопластика; В – разрушение двухкомпонентной частицы с образованием микроволокон; С – микробиологическое разрушение под действием диатомовых водорослей при их росте; D – минералогическое разрушение, вызванное ростом микрокристалла в теле волокна

Fig. 5. SEM-images, illustrating the mechanisms of microplastics destruction: A – local flake of nanoplastics particles; B – destruction of bicomponent polymer with microfibers formation; C – microbiological destruction under the impact of diatoms; D – mineralogical destruction caused by crystal formation in the fiber

с размерами 0,01–5,00 мм [Bagaev, Zobkov, 2021]. В модель внесены эмпирические параметризации положения разлома, вероятности разлома в зависимости от формы частицы и удаление самых мелких частиц при переходе в микронный размерный класс (нанопластик).

Для моделирования собственно процесса фильтрации на сетке была разработана модель, которая пропускает заданный набор трехмерных частиц (в квазиэллиптическом приближении) через двумерную сетку с задан-

ым размером ячейки [Bagaev, Zobkov, 2021]. Случайно задаваемые параметры определяют угол поворота частицы в пространстве, размер ее проекции на двумерную плоскость и положение центра частицы относительно углов ячейки. Проведено сопряжение результатов моделирования разрушения пластика со стохастической моделью фильтрации частиц МП. Эта модель позволила качественно показать, как изменяется форма размерно-частотного распределения частиц МП, если они фильтруются через

нейстонную сеть. С использованием опубликованных данных уточнены формы размерно-частотных распределений МП, выделена область гистограммы, которая хорошо аппроксимируется степенным законом распределения случайной величины, что согласуется с известными в природе распределениями, например размеров обломков камней [Turcotte, 1997] и органической взвеси [Davies et al., 2021].

При сравнении отклонения модельного размерно-частотного распределения при различных размерах ячейки фильтрующей сетки удалось показать, что использование фильтрующей сети при отборе проб вносит искажение в общее размерно-частотное распределение частиц и занижает оценку общего количества частиц в пробе. Данная эмпирическая зависимость была выражена в аналитическом виде, что в дальнейшем позволит ее применять для коррекции наблюдаемых в природе распределений и проводить сравнение результатов, полученных с применением сетей с различной ячейкой (рис. 6). Сравнение получаемых с помощью модели результатов сопоставимо с результатами натуральных исследований, проведенных с использованием сетей различного размера [Michida et al., 2019].

Сорбция тяжелых металлов частицами микропластика

Выявлена сорбционная способность образцов микропластика к красителям МС и МЖ [Kulik et al., 2023]. Адсорбция МС говорит о наличии функциональных групп кислотного характера на поверхности образцов, причем для состаренных пластиков это значение выше, чем для новых, что может быть связано с увеличением количества кислородсодержащих групп, которые, как правило, выступают активными центрами, присутствующими на поверхности пластика. Присутствие активных функциональных групп, сорбирующих основной краситель МС, позволило предположить наличие взаимодействия кислородсодержащих функциональных групп с катионами тяжелых металлов. В дальнейших экспериментах было показано наличие взаимодействия тяжелых металлов с частицами МП, а также получены его сорбционные характеристики [Kulik et al., 2023].

По результатам 24-часовых экспериментов, проведенных с искусственно измельченными частицами РЕТ в воде Онежского озера, были получены изотермы сорбции $\Gamma = f(C_p)$ на поверхности частиц РЕТ для пяти металлов (Co, Ni, Cu,

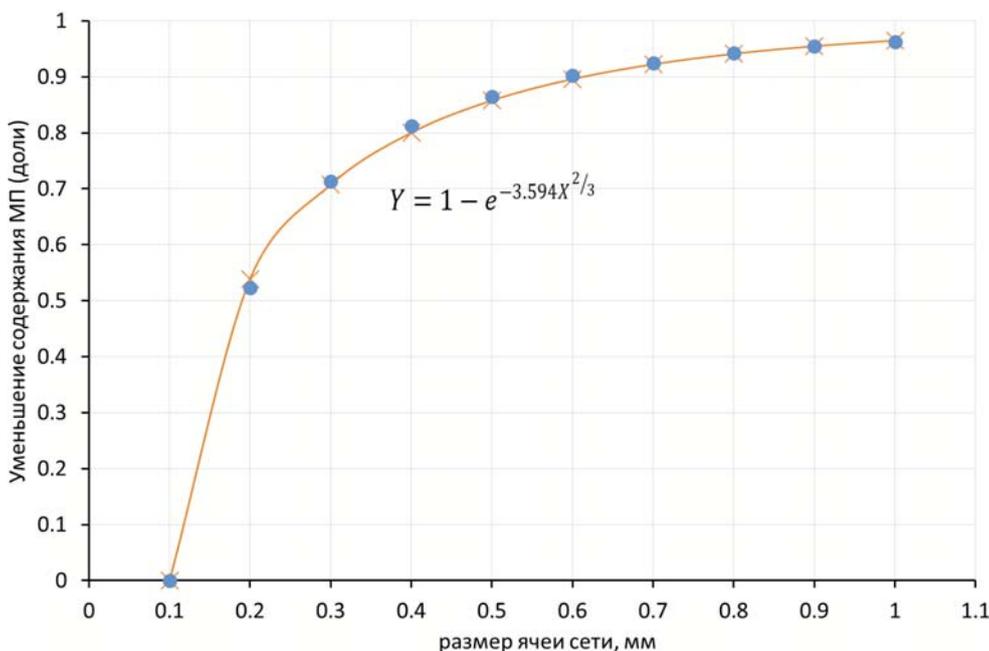


Рис. 6. Доля потерь частиц микропластика при использовании сетей с ячейкой различных размеров: от 0,1 (условно принято как нулевые потери) до 1,0 мм (96 % потерь) согласно разработанной модели. Синие круги – точки, полученные по модели; оранжевая линия – результат интерполяции аналитической зависимостью

Fig. 6. Calculated microplastics loss in meshes of different sizes: from 0.1 (conventionally attributed to zero loss) to 1.0 mm (96 % loss). Blue circles – points from mathematical model, orange line – interpolation with analytical function

Cd, Pb). Выявлено, что изотермы сорбции ТМ в природных водах существенно отличаются от получаемых в дистиллированной воде. В первую очередь это связано с присутствием в природных водах органического вещества, с которым ТМ образуют стойкие комплексы, а также относительно высокой концентрацией в них Fe и Mn, конкурирующих с другими металлами за активные центры и влияющих на их сорбционную способность [Kulik et al., 2023].

Поглощение частиц микропластика водными организмами

Во всех вариантах опыта с частицами ABS четырех размерных классов (<50; 50–100; 100–250; >250 мкм) рачок *G. fasciatus* активно поглощал частицы МП [Kalinkina et al., 2022]. В опытах с частицами размером 100–250 мкм рачками потреблено наибольшее количество частиц. Ракообразные, выжившие в пятисуточном эксперименте, проглатывали более мелкие частицы, чем погибшие. Кроме того, установлено, что ракообразные *G. fasciatus* предпочитают наиболее мелкие частицы среди тех, что находились в суспензии (рис. 7). Средний размер проглоченных частиц составил 100 ± 5 мкм. При сопоставлении количества проглоченных рачками *G. fasciatus* частиц с их концентрацией в тестируемой среде рассчитана максимальная

скорость поглощения частиц микропластика: 2×10^{-5} (экз. · сут)⁻¹ [Kalinkina et al., 2022].

Чтобы оценить последствия загрязнения частицами МП литоральной зоны Онежского озера для популяции *G. fasciatus*, использованы данные по концентрации фрагментов микропластика в донных отложениях устья р. Шуя, впадающей в Петрозаводскую губу Онежского озера [Zobkov et al., 2020a]. Концентрация фрагментов МП в илах этого района составила 2314 фрагментов МП/кг СВ. Оказалось, с учетом максимальной продолжительности активного питания взрослых самцов *G. fasciatus* около 6 месяцев, максимальной концентрации фрагментов, наблюдаемой нами в Онежском озере, и расчетной скорости потребления рассматриваемой размерной фракции МП можно ожидать, что в природных условиях одна особь *G. fasciatus* может проглотить только одну частицу МП за свой жизненный цикл. Таким образом, в условиях современного уровня загрязнения литорали Онежского озера частицами МП неправильной формы и размером около 100 мкм их негативное действие на популяцию *G. fasciatus* маловероятно. Для оценки влияния других форм и размеров МП на экосистему озера в целом требуется дальнейшее изучение скорости потребления водными организмами волокон, которые преобладают в воде и донных осадках Онежского озера, а также возможности передачи МП по пищевым цепям.

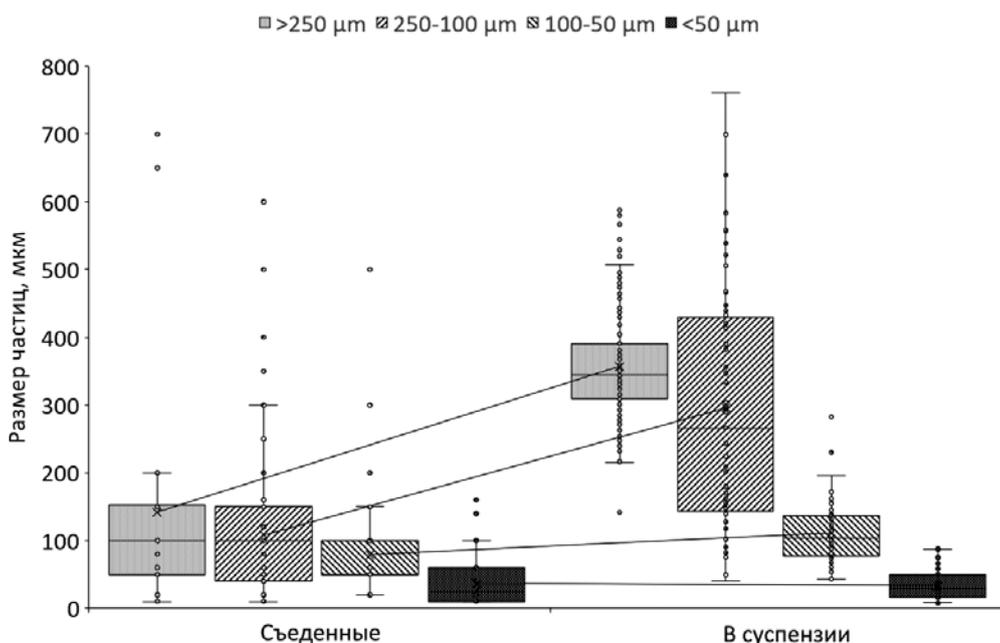


Рис. 7. Зависимость между размером частиц, съеденных рачками *G. fasciatus* в эксперименте, и размером частиц, присутствовавших в воде

Fig. 7. Box plot of the size of the ingested polymer particles and those that were in the suspension in different treatments

Выводы

Сезонные гидрохимические исследования на Онежском озере, проведенные в 2019–2021 гг., позволили оценить современное его состояние по химическим показателям. Проанализировано изменение некоторых характеристик химического состава воды в многолетнем плане с привлечением архивных данных. Установлено, что пелагиаль Онежского озера (центральная и южная части, Большое и Малое Онего, Заонежский залив) сохраняет высокое качество воды. Вместе с тем отмечается тенденция к снижению соотношения $N_{\text{мин}} : P_{\text{общ}}$ за последние тридцать лет в большинстве районов озера, что свидетельствует о признаках его эвтрофирования. По химическим показателям качества воды определена степень загрязнения малых притоков Онежского озера, подверженных влиянию полигонов захоронения ТБО и активных илов станции биологической очистки сточных вод г. Петрозаводска. Определены объемы выноса загрязняющих веществ с водами этих рек в Онежское озеро.

Современное содержание Zn, Pb, Cd и Ni в воде Онежского озера существенно ниже их ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Концентрации, превышающие ПДК, отмечены для Cu и в ряде случаев для Fe и Mn, что характерно для поверхностных вод Карелии. Вместе с тем за счет протекания внутриводоемных процессов трансформации веществ в воде Онежского озера их концентрация намного ниже, чем в среднем по региону. Повышенное содержание металлов по сравнению с открытой частью озера отмечается в Кондопожской и Петрозаводской губах, принимающих промышленные и бытовые сточные воды, однако концентрация ТМ в них не превышает ПДК.

Определено содержание микропластика и установлены закономерности его распределения в донных осадках Онежского озера. Обнаружено активное аккумулятивное микропластика в донных осадках озера. Содержание МП в осадках озера примерно в 2 раза выше, чем Балтийского моря. Установлено, что накопление МП зависит от гидродинамических факторов и находится во взаимосвязи с физико-химическими параметрами осадка. Эти результаты показывают, что крупные водные объекты суши являются первичными приемниками и накопителями этого нового вида загрязнения, что необходимо учитывать при обосновании инновационной стратегии охраны водных объектов.

Выявлены пространственные и сезонные закономерности распределения микропластика в водном столбе Онежского озера. В весенний

период наблюдается максимальное его содержание в воде озера, в то время как летом оно существенно ниже. Вместе с тем содержание микропластика в воде озера существенно выше, чем ранее было установлено для Балтийского моря с применением ячеей такого же размера, что согласуется с данными по донным осадкам, полученными нами ранее.

С помощью SEM-EDS и рамановской спектроскопии выявлен механизм минералогической деструкции пластика, определяемый кристаллизацией и ростом микроминералов, что приводит к локальным разрывам пластика и ускорению процессов его деструкции. Обнаружено, что пластики являются носителями ТМ в форме нано- и микроразмерных включений на поверхности, в порах и трещинах пластика. Диатомовые водоросли *Aulacoseira islandica*, *Tabellaria flocculosa*, *Aulacoseira* sp. и др., обнаруженные на поверхности и в порах пластика, выделенных из водных проб, увеличивают удельную плотность частиц МП. Морфологическая структура поверхности полимеров, найденных в природе, характеризуется наличием микро- и наноразмерных слоев, пор, трещин, причем их количество зависит от типа пластика и степени его деструкции.

В результате экспериментальных работ модифицирована методика экстракции МП из донных отложений. Разработаны методики фракционирования частиц МП и десорбции металлов с поверхности частиц МП, позволившие получить сопоставимые и воспроизводимые результаты анализа содержания металлов на их поверхности. При изучении процесса сорбции получены его количественные и качественные характеристики.

Впервые предложены модель генерации МП из набора макрофрагментов за счет стохастического разрушения и модель фильтрации трехмерных фрагментов МП на сетке. Установлено хорошее соответствие результатов, полученных с помощью моделей, с наблюдаемыми в природе распределениями. Впервые предложена модель фильтрации трехмерных фрагментов МП, которая позволяет объяснить форму некоторых наблюдаемых в природе распределений. Проведенные эксперименты показали, что использование сети при отборе проб воды влияет на форму размерно-частотного распределения частиц. Проведенный регрессионный анализ зависимости величины потерь от размера сетки позволил выявить и параметризовать эту зависимость в виде аналитической функции. Выявленная зависимость может быть использована для корректировки наблюдаемых в природе уровней МП

в зависимости от размера ячеи сети, применяемой при отборе проб.

Установлено, что в условиях современного уровня загрязнения литорали Онежского озера частицами МП неправильной формы и размером около 100 мкм их негативное действие на популяцию *G. fasciatus* маловероятно.

Литература

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.

Зобков М. Б., Зобкова М. В., Сабылина А. В., Ефремова Т. А. Оценка воздействия фильтрационных вод полигонов захоронения отходов и активных илов на качество воды малых рек гумидной зоны // Теоретическая и прикладная экология. 2021а. № 4. С. 119–126. doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-119-126

Зобков М. Б., Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Белкина Н. А., Ковалевский В. В., Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Галахина Н. Е. Озера как аккумуляторы микропластика на его пути с суши в Мировой океан. Обзор исследований // Известия РГО. 2021б. Т. 15, № 4. С. 68–86. doi: 10.31857/s0869607121040054

Лозовик П. А. Нормирование допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты с экологических и геохимических позиций // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года». Петрозаводск, 2015. С. 446–452.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Лозовик П. А., Кулик Н. В., Ефременко Н. А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 62–74. doi: 10.17076/lim1189

Лозовик П. А., Платонов А. В. Определение региональных предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ на примере Карельского гидрографического района // Геоэкология, инженерная геология, гидрология, геохронология. 2005. № 6. С. 527–532.

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону, 2002. 49 с.

Росстат, 2020. Федеральная служба государственной статистики. Показатели муниципальных районов.

Сабылина А. В. Химический состав воды Онежского озера // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 72–77.

Сабылина А. В., Рыжак А. В. Химический состав воды Онежского озера // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 29–40.

Amaral-Zettler L. A., Zettler E. R., Slikas B., Boyd G. D., Melvin D. W., Morrall C. E., Proskurrowski G., Mincer T. J. The biogeography of the Plasticsphere: implications for policy // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2015. Vol. 13(10). P. 541–546. doi: 10.1016/S0025-326X(01)00114-X

Andrady A. L. Microplastics in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2011. Vol. 62. P. 1596–1605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Ashton K., Holmes L., Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2010. Vol. 60. P. 2050–2055. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.07.014

Bagaev A., Zobkov M. Prediction of microplastics particles size-frequency distribution via the stochastic modelling of their formation and filtration on the net // EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-7761. doi: 10.5194/egusphere-egu21-7761

Beeton A. M. Large freshwater lakes: present state, trends, and future // *Environ. Conserv.* 2002. Vol. 29(1). P. 21–38. doi: 10.1017/S0376892902000036

Ballent A., Corcoran P. L., Madden O., Helm P. A., Longstaffe F. J. Sources and sinks of MPs in Canadian Lake Ontario nearshore, tributary and beach sediments // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. Vol. 110(1). P. 383–395. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.037

Brennecke D., Duarte B., Paiva F., Caçador I., Canning-Clode J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2016. Vol. 178. P. 189–195.

Browne M. A., Crump P., Niven S. J., Teuten E. L., Tonkin A., Galloway T., Thompson R. C. Accumulations of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks // *Environ. Sci. Technol.* 2011. Vol. 45. P. 9175–9179. doi: 10.1021/es201811s

Dris R., Imhof H., Sanchez W., Gasperi J., Galgani F., Tassin B., Laforsch C. Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles // *Environ. Chem.* 2015. Vol. 12(5). P. 539–550. doi: 10.1071/EN14172

Dubaish F., Liebezeit G. Suspended microplastics and black carbon particles in the jade system, Southern North Sea // *Water Air Soil Pollut.* 2013. Vol. 224. doi: 10.1007/s11270-012-1352-9

Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I. Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // *Data in brief*. 2020. Vol. 28. Art. 104887. doi: 10.1016/j.dib.2019.104887

- Fendall L. S., Sewell M. A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastic facial cleansers // *Mar. Pollut. Bull.* 2009. Vol. 58. P. 1255–1228. doi: 10.1016/j.marpolbul.2009.04.025
- Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // *Environ. Nanotechnol. Monit. Mag.* 2022. Vol. 17. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619
- Gregory M. R. Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions // *Philos. Trans. R. Soc. B.* 2009. Vol. 364(1526). P. 2013–2025.
- International Organization for Standardization (ISO) TR 21960:2020. Plastics-Environmental aspects - State of knowledge and methodologies. 2020.
- Kalinkina N., Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N. Assessment of the microplastics size range and ingestion intensity by *Gmelinoides fasciatus* Stebbing, an invasive species of Lake Onego // *Environ. Toxicol. Chem.* 2022. Vol. 41(1). P. 184–192. doi: 10.1002/etc.5257
- Kovalevski V., Zobkov M. Destruction of microplastics in the natural environment // EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-5407. doi: 10.5194/egusphere-egu21-5407
- Kulik N., Efremenko N. Assessment of the sorption capacity of PET microparticles in natural water with respect to metals // EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-4438. doi: 10.5194/egusphere-egu21-4438
- Kulik N. V., Zobkov M. B., Efremenko N. A., Kovalevski V. V., Rozhkova V. S. Features of Heavy Metals Sorption by Microplastics in Environmentally Relevant Conditions // *Water Resources.* 2023. Vol. 50, no. 6. P. 897–910. doi: 10.1134/S0097807823700203
- Lin L., Zuo L. Z., Peng J. P., Cai L. Q., Fok L., Yan Y., Li H., Xu X. R. Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou City, China // *Science of the total environment.* 2018. Vol. 644. P. 375–381. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.327
- Magnusson K., Norén F. Screening of microplastic particles in and downstream a wastewater treatment plant: Report C 55. IVL Swedish Environmental Research Institute. 2014.
- Masura J., Baker J. E., Foster G. D., Arthur C., Herring C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. 2015. URL: https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf (дата обращения: 06.07.2015).
- Michida Y., Chavanich S., Chiba S., Cordova M. R., Cozsar Cabanas A., Glagani F., Hagmann P., Hinata H., Isoze A., Kershaw P., Kozlovskii N., Li D., Lusher A. L., Marti E., Mason S. A., Mu J., Saito H., Shim W. J., Syakti A. D., Takada H., Thompson R., Tokai T., Uchida K., Vasilenko K., Wang J. Guidelines for harmonizing ocean surface microplastic monitoring methods. Version 1.1. Ministry of the Environment, Japan. 2019. doi: 10.25607/OBP-867
- Moore C. J., Moore S. L., Leecaster M. K., Weisberg S. B. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre // *Mar. Pollut. Bull.* 2001. Vol. 42(12). P. 1297–1300. doi: 10.1016/S0025-326X(01)00114-X
- Peng G., Xu P., Zhu B., Bai M., Li D. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: a case study of risk assessment in megacities // *Environ. Pollut.* 2018. Vol. 234. P. 448–456. doi: 10.1016/j.envpol.2017.11.034
- Rozhkova V. S., Kovalevski V. V. Determination of adsorption of cationic and anionic dyes onto shungite by Raman spectroscopy // *Spectroscopy.* 2019. Vol. 34(7). P. 45–54.
- Shruti V. C., Jonathan M. P., Rodriguez-Espinosa P. F., Rodriguez González F. Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla city, Mexico // *Sci. Total Environ.* 2019. Vol. 654. P. 154–163. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.054
- Talvitie J., Mikola A., Setälä O., Heinonen M., Koistinen A. How well is microliter-purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microliter in a tertiary level wastewater treatment plant // *Water Res.* 2017. Vol. 109. P. 164–172.
- Turcotte D. L. Fractals and chaos in geology and geophysics, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.; New York, 1997.
- Wen X., Du C., Xu P., Zeng G., Huang D., Yin L., Yin Q., Hu L., Wan J., Zhang J., Tan S., Deng R. Microplastic pollution in surface sediments of urban water areas in Changsha, China: abundance, composition, surface textures // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. Vol. 136. P. 414–423. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.09.043
- UNEP. Plastic in cosmetics. 2015. 33 p.
- Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: a journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020a. Vol. 8(5). doi: 10.1016/j.jece.2020.104367
- Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastics in Lake Onego sediments: occurrence and accumulation patterns // EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-4028. doi: 10.5194/egusphere-egu21-4028
- Zobkov M. B., Esiukova E. E. Evaluation of the Munich Plastic Sediment Separator efficiency in extraction of microplastics from natural marine bottom sediments // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 2017. Vol. 15. P. 967–978. doi: 10.1002/lom3.10217
- Zobkov M. B., Esiukova E. E. Microplastics in a marine environment: Review of methods for sampling, processing, and analyzing microplastics in water, bottom sediments, and coastal deposits // *Oceanology.* 2018. Vol. 58. P. 137–143. doi: 10.1134/S0001437017060169
- Zobkov M. B., Esiukova E. E., Zyubin A. Y., Samusev I. G. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2019. Vol. 138. P. 193–205. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.047
- Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T. Method for microplastics extraction from Lake sediments // *MethodsX.* 2020b. Vol. 7. doi: 10.1016/j.mex.2020.101140

References

- Amaral-Zettler L. A., Zettler E. R., Slikas B., Boyd G. D., Melvin D. W., Morrall C. E., Proskurowski G., Mincer T. J. The biogeography of the Plastisphere: implications for policy. *Front. Ecol. Environ.* 2015;13(10): 541–546. doi: 10.1016/S0025-326X(01)00114-X
- Andrady A. L. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 2011;62:1596–1605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
- Ashton K., Holmes L., Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 2010;60:2050–2055. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.07.014
- Bagaev A., Zobkov M. Prediction of microplastics particles size-frequency distribution via the stochastic modelling of their formation and filtration on the net. *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-7761. doi: 10.5194/egusphere-egu21-7761
- Balaganskii A. F., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Salo Yu. A. Water runoff resources and water balance. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha severo-zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 31–38. (In Russ.)
- Ballent A., Corcoran P. L., Madden O., Helm P. A., Longstaffe F. J. Sources and sinks of MPs in Canadian Lake Ontario nearshore, tributary and beach sediments. *Mar. Pollut. Bull.* 2016;110(1):383–395. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.037
- Beeton A. M. Large freshwater lakes: present state, trends, and future. *Environ. Conserv.* 2002;29(1):21–38. doi: 10.1017/S0376892902000036
- Brennecke D., Duarte B., Paiva F., Caçador I., Canning-Clode J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2016;178:189–195. doi: 10.1016/j.ecss.2015.12.003
- Browne M. A., Crump P., Niven S. J., Teuten E. L., Tonkin A., Galloway T., Thompson R. C. Accumulations of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environ. Sci. Technol.* 2011;45:9175–9179. doi: 10.1021/es201811s
- Dris R., Imhof H., Sanchez W., Gasperi J., Galgani F., Tassin B., Laforsch C. Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles. *Environ. Chem.* 2015;12(5):539–550. doi: 10.1071/EN14172
- Dubaish F., Liebezeit G. Suspended microplastics and black carbon particles in the jade system, Southern North Sea. *Water Air Soil Pollut.* 2013;224. doi: 10.1007/s11270-012-1352-9
- Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I. Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016. *Data in Brief.* 2020;28:104887. doi: 10.1016/j.dib.2019.104887
- Fendall L. S., Sewell M. A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplasticin facial cleansers. *Mar. Pollut. Bull.* 2009;58:1255–1228. doi: 10.1016/j.marpolbul.2009.04.025
- Filatov N. N. (ed.). Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. 151 p. (In Russ.)
- Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2022;17. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619
- Gregory M. R. Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitchhiking and alien invasions. *Philos. Trans. R. Soc. B.* 2009;364(1526):2013–2025.
- International Organization for Standardization (ISO) TR 21960:2020. Plastics-Environmental aspects - State of knowledge and methodologies. 2020.
- Kalinkina N., Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N. Assessment of the microplastics size range and ingestion intensity by *Gmelinoides fasciatus* Stebbing, an invasive species of Lake Onego. *Environ. Toxicol. Chem.* 2022;41(1):184–192. doi: 10.1002/etc.5257
- Kovalevski V., Zobkov M. Destruction of microplastics in the natural environment. *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-5407. doi: 10.5194/egusphere-egu21-5407
- Kulik N., Efremenko N. Assessment of the sorption capacity of PET microparticles in natural water with respect to metals. *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-4438. doi: 10.5194/egusphere-egu21-4438
- Kulik N. V., Zobkov M. B., Efremenko N. A., Kovalevski V. V., Rozhkova V. S. Features of Heavy Metals Sorption by Microplastics in Environmentally Relevant Conditions. *Water Resources.* 2023;50(6):897–910. doi: 10.1134/S0097807823700203
- Lin L., Zuo L. Z., Peng J. P., Cai L. Q., Fok L., Yan Y., Li H., Xu X. R. Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou City, China. *Sci. Total Environ.* 2018;644:375–381. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.327
- Lozovik P. A. Regulation of the permissible anthropogenic loads on water bodies through the lens of ecology and geochemistry. *Nauchnoe obespechenie realizatsii "Vodnoi strategii rossiiskoi federatsii na period do 2020 goda" = Scientific foundations of the "Water Strategy of the Russian Federation for the period up to 2020".* Petrozavodsk; 2015. P. 446–452. (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 Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2016;5:35–52. doi: 10.17076/lim303 (In Russ.)
- Lozovik P. A., Efremenko N. A. (eds.). Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)
- Lozovik P. A., Kulik N. V., Efremenko N. A. Lithophile elements and heavy metals in Lake Onego: sources, concentrations and transformation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian*

Research Centre RAS. 2020;4:62–74. doi: 10.17076/lim1189 (In Russ.)

Lozovik P. A., Platonov A. V. Determination of regional maximum permissible concentrations of pollutants by the example of Karelia hydrographic region. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrologiya, geokriologiya = Environmental Geoscience*. 2005;6:527–532. (In Russ.)

Magnusson K., Norén F. Screening of microplastic particles in and downstream a wastewater treatment plant: Report C 55. IVL Swedish Environmental Research Institute. 2014.

Masura J., Baker J. E., Foster G. D., Arthur C., Herring C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. 2015. URL: https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf (accessed: 06.07.2015).

Michida Y., Chavanich S., Chiba S., Cordova M. R., Cozsar Cabanas A., Glagani F., Hagmann P., Hinata H., Isobe A., Kershaw P., Kozlovskii N., Li D., Lusher A. L., Marti E., Mason S. A., Mu J., Saito H., Shim W. J., Syakti A. D., Takada H., Thompson R., Tokai T., Uchida K., Vasilenko K., Wang J. Guidelines for harmonizing ocean surface microplastic monitoring methods. Version 1.1. Ministry of the Environment, Japan. 2019. doi: 10.25607/OBP-867

Moore C. J., Moore S. L., Leecaster M. K., Weisberg S. B. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre. *Mar. Pollut. Bull.* 2001;42(12): 1297–1300. doi: 10.1016/S0025-326X(01)00114-X

Peng G., Xu P., Zhu B., Bai M., Li D. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: a case study of risk assessment in megacities. *Environ. Pollut.* 2018;234:448–456. doi: 10.1016/j.envpol.2017.11.034
RD 52.24.643-2002. Guidance document. The method of complex assessment of the degree of contamination of surface waters by hydrochemical indicators. Rostov-na-Donu; 2002. 49 p. (In Russ.)

Rozhkova V. S., Kovalevski V. V. Determination of adsorption of cationic and anionic dyes onto shungite by Raman spectroscopy. *Spectroscopy*. 2019;34(7):45–54.

Rosstat, 2020. Federal State Statistics Service. Municipal districts data. (In Russ.)

Sabylina A. V. Chemical composition of Lake Onego water. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha severo-zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 72–77. (In Russ.)

Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Chemical composition of Lake Onego water. *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg. = State of water bodies in the Republic of Karelia. According to the monitoring results in 1998–2006*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. P. 29–40. (In Russ.)

Shruti V. C., Jonathan M. P., Rodriguez-Espinoza P. F., Rodríguez González F. Microplastics in freshwater

sediments of Atoyac River basin, Puebla city, Mexico. *Sci. Total Environ.* 2019;654:154–163. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.054

Talvitie J., Mikola A., Setälä O., Heinonen M., Koistinen A. How well is microliter-purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microliter in a tertiary level wastewater treatment plant. *Water Res.* 2017;109:164–172.

Turcotte D. L. Fractals and chaos in geology and geophysics, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.; New York; 1997.

Wen X., Du C., Xu P., Zeng G., Huang D., Yin L., Yin Q., Hu L., Wan J., Zhang J., Tan S., Deng R. Microplastic pollution in surface sediments of urban water areas in Changsha, China: abundance, composition, surface textures. *Mar. Pollut. Bull.* 2018;136:414–423. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.09.043

UNEP. Plastic in cosmetics. 2015. 33 p.

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: a journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020;8(5). doi: 10.1016/j.jece.2020.104367

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastics in Lake Onego sediments: occurrence and accumulation patterns. *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-4028. doi: 10.5194/egusphere-egu21-4028

Zobkov M. B., Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Belkina N. A., Kovalevskij V. V., Zobkova M. V., Efremova T. A., Galakhina N. E. Lakes as accumulators of microplastics on the way from land to the World ocean: A review. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2021;15(4):68–86. doi: 10.31857/s0869607121040054 (In Russ.)

Zobkov M. B., Esiukova E. E. Evaluation of the Munich Plastic Sediment Separator efficiency in extraction of microplastics from natural marine bottom sediments. *Limnol. Oceanogr. Methods*. 2017;15:967–978. doi: 10.1002/lom3.10217

Zobkov M. B., Esiukova E. E. Microplastics in a marine environment: Review of methods for sampling, processing, and analyzing microplastics in water, bottom sediments, and coastal deposits. *Oceanology*. 2018;58:137–143. doi: 10.1134/S0001437017060169

Zobkov M. B., Esiukova E. E., Zyubin A. Y., Samusev I. G. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 2019;138: 193–205. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.047

Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T. Method for microplastics extraction from Lake sediments. *MethodsX*. 2020;7. doi: 10.1016/j.mex.2020.101140

Zobkov M. B., Zobkova M. V., Sabylina A. V., Efremova T. A. Assessment of the impact of seepage waters in landfills for solid waste and activated sludge on the water quality of small rivers in the humid zone. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2021;4:119–126. doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-119-126 (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зобков Михаил Борисович

канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрохимии и гидрогеологии
e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Калинкина Наталия Михайловна

докт. биол. наук, руководитель лаборатории гидробиологии
e-mail: cerioda@mail.ru

Ковалевский Владимир Викторович

докт. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией геологии
и технологии шунгитов Отдела минерального сырья
e-mail: kovalevs@krc.karelia.ru

Багаев Андрей Владимирович

канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: a.bagaev1984@gmail.com

Белкина Наталья Александровна

докт. геогр. наук, ведущий научный сотрудник,
руководитель группы исследований донных отложений
e-mail: bel110863@mail.ru

Кулик Наталья Владимировна

младший научный сотрудник
e-mail: nadiet11@rambler.ru

Зобкова Мария Валентиновна

научный сотрудник
e-mail: rincalika21@yandex.ru

Ефремова Татьяна Алексеевна

младший научный сотрудник
e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Галахина Наталия Евгеньевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник
e-mail: kulakovanata@mail.ru

Ефременко Наталья Анатольевна

главный химик лаборатории гидрохимии и гидрогеологии
e-mail: efremna@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Zobkov, Mikhail

Cand. Sci. (Tech.), Head of Laboratory of Hydrochemistry
and Hydrogeology

Kalinkina, Natalia

Dr. Sci. (Biol.), Head of Laboratory of Hydrobiology

Kovalevski, Vladimir

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory of Shungite
Geology and Technology, Department of Mineral Raw Materials

Bagaev, Andrey

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

Belkina, Natalya

Dr. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, Leader of Bottom
Sediment Research Group

Kulik, Natalya

Junior Researcher

Zobkova, Maria

Researcher

Efremova, Tatyana

Junior Researcher

Galakhina, Natalia

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Laboratory
of Hydrochemistry and Hydrogeology

Efremenko, Natalya

Chief Chemist, Laboratory of Hydrochemistry
and Hydrogeology

УДК 556.314

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТРЕДУКЦИИ В ВОДЕ ОЗЕР НА ТЕРРИТОРИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «КЕНОЗЕРСКИЙ»

К. В. Титова^{1*}, Н. М. Кокрятская¹, С. С. Попов¹, О. Ю. Морева¹,
А. В. Брагин²

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

² ФГБУ «Национальный парк «Кенозерский» (наб. Северной Двины, 78, Архангельск, Россия, 163000)

В ходе экспедиционных работ в марте 2022 года отобраны образцы воды на трех озерах – Масельгское, Пежихерье и Лёкшмозеро. Проведены исследования образцов методами жидкостной хроматографии, фотоколориметрии, кондуктометрии, потенциометрии. По результатам исследований вода этих озер по усредненным значениям минерализации отнесена к категории ультрапресных (<100 мг/л). Полученными данными подтвердили принадлежность вод исследованных водоемов к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе. На всех глубоководных станциях водная толща была стратифицирована по содержанию кислорода. Граница смены аэробных условий на анаэробные приходилась для оз. Масельгское на глубину 14–14,5 м, оз. Пежихерье – 16–16,5 м, оз. Лёкшмозеро – 21–21,5 м. За прошедшие с момента предыдущего исследования 10 лет расположение этого пограничного слоя не изменилось. В озерах Масельгское и Пежихерье наблюдаемая концентрация сероводорода в анаэробной зоне превышает его ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, в оз. Лёкшмозеро его количество минимально и близко к допустимым значениям. Распространению сероводорода по всей толще воды препятствует наличие аэробной зоны. В придонном слое оз. Масельгское обнаружена высокая концентрация растворенного железа (до 17 000 мкг/л), что сопоставимо с его содержанием в оз. Светлое (Приморский район Архангельской области), которое является уникальным меромиктическим водоемом со специфическим железо-марганцевым типом. По содержанию биогенных элементов подтвержден мезотрофный тип водоемов. При этом отмечено некоторое увеличение концентрации фосфатов и аммония в придонном слое оз. Масельгское в многолетнем аспекте, что может свидетельствовать о протекании активных процессов анаэробной минерализации органического вещества.

Ключевые слова: Архангельская область; национальный парк «Кенозерский»; озера; органическое вещество; соединения серы; железо

Для цитирования: Титова К. В., Кокрятская Н. М., Попов С. С., Морева О. Ю., Брагин А. В. Изучение процесса сульфатредукции в воде озер на территории национального парка «Кенозерский» // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 53–65. doi: 10.17076/lim1744

Финансирование. Работа выполнена на основании госзадания за счет средств Минобрнауки РФ, проект № FUUW-2022-0026 «Изучение закономерностей биогеохимических процессов циклов серы и хлора в экосистемах Европейского Севера России».

**K. V. Titova^{1*}, N. M. Kokryatskaya¹, S. S. Popov¹, O. Yu. Moreva¹, A. V. Bragin².
STUDYING THE PROCESS OF SULFATE REDUCTION IN THE WATER OF LAKES
IN THE KENOZERSKY NATIONAL PARK**

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

² *Kenozersky National Park (78 Nab. Severnoy Dviny, 163000 Arkhangelsk, Russia)*

During fieldwork in March 2022 water samples were taken from three lakes: Maselgskoye, Pezhikherie, and Lyokshmozero. The samples were studied by liquid chromatography, photocolormetry, conductometry, and potentiometry. Based on the results, the water of these lakes was classified as ultra fresh (average TDS <100 mg/l). The data obtained confirm that water in the studied reservoirs belongs to the calcium hydrogen carbonate class. At all deep-water sampling sites, the water column was stratified by the oxygen content. The oxic-anoxic interface was found at 14–14.5 m depth in Lake Maselgskoye, at 16–16.5 m in Lake Pezhikherie, and at 21–21.5 m in Lake Lyokshmozero. Over the past 10 years since the previous study, the position of this boundary layer has not changed. In lakes Maselgskoye and Pezhikherie, the observed concentration of hydrogen sulfide in the anoxic zone exceeded its MPC for fishery water bodies. The level of this compound in Lyokshmozero was minimal and close to acceptable values. The spreading of hydrogen sulfide throughout the entire water column is prevented by the presence of an oxic zone. The near-bottom layer of Lake Maselgskoye contained a high concentration of dissolved iron (up to 17 000 µg/l), which is comparable to its content in Lake Svetloye (Primorsky District, Arkhangelsk Region), which is a unique meromictic reservoir of a specific iron-manganese type. According to the content of nutrients, the lakes are classified as mesotrophic. That said, we detected a slight increase in the concentration of phosphates and ammonium in the near-bottom layer of Lake Maselgskoye over a long term, which may point to ongoing active anaerobic mineralization of organic matter.

Keywords: Arkhangelsk Region; Kenozersky National Park; lakes; organic matter; sulfur compounds; iron

For citation: Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Popov S. S., Moreva O. Yu., Bragin A. V. Studying the process of sulfate reduction in the water of lakes in the Kenozersky National Park. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 53–65. doi: 10.17076/lim1744

Funding. The activities were carried out under state order funded by the Ministry of Science and Higher Education Russia, project # FUUW-2022-0026 “Investigation of patterns in the biogeochemical cycling of sulphur and chlorine in ecosystems of North European Russia”.

Введение

Актуальность исследования биогеохимических процессов, протекающих в водных объектах арктической, субарктической и бореальной природных зон Европейского Севера России, определяется прежде всего важностью этих процессов для экологического состояния водоемов. В силу замедленного метаболизма экосистемы северных территорий особенно чувствительны к внешним воздействиям. В этих условиях изучение биогеохимических процессов (их особенностей, закономерностей для морских и пресноводных экосистем) при-

обретает особое значение, однако имеющаяся информация о подобных исследованиях по-прежнему является довольно ограниченной и недостаточной.

Как известно [Кузнецов, 1952; Беляев и др., 1981; Волков, 1984], одним из важнейших процессов анаэробной минерализации органического вещества наряду с метаногенезом является микробное восстановление сульфатов до сероводорода (сульфатредукция). Генерируемый в ходе этого процесса сероводород крайне токсичен, является сильнейшим восстановителем, то есть способен влиять на окислительно-восстановительную обстановку в водо-

еме, что, в свою очередь, влияет на состояние (например, токсичность и подвижность) многих других элементов. Интенсивность сульфатредукции определяется содержанием сульфатов, скоростью осадконакопления, количеством и доступностью для микроорганизмов органического вещества, активностью микробного сообщества и др., то есть параметрами, определяемыми не только естественными, природными причинами, но и антропогенной нагрузкой.

Важное экологическое значение сульфатредукторов связано с их участием в процессе деструкции органического вещества и продуцировании химически активного вещества H_2S [Намсараев, Земская, 2000]. Содержание сероводорода в значительной мере зависит от наличия кислорода в водной толще. Поэтому его образование в основном локализовано в донных осадках и частично в придонных слоях воды. Особенно опасным является накопление сероводорода в придонных слоях, где находятся нерестилища некоторых видов рыб. Для оценки возможных токсических эффектов восстановленных сернистых веществ необходимо знать пределы их токсических влияний.

В растворенном состоянии сульфиды могут находиться в ионной форме и в молекулярной форме в виде сероводорода. Соотношение этих форм зависит от значения pH. Знание фактического содержания сероводорода в растворенной молекулярной форме необходимо, потому что токсичность его намного выше, чем у ионных форм, что, вероятно, связано с его сильными восстановительными свойствами. Предполагают, что сероводород может нарушать дыхательный процесс рыб. Он также является токсичным и для других гидробионтов [Тимофеева и др., 1991]. Установлена ПДК для вод рыбохозяйственного назначения, равная $0,005 \text{ мг/дм}^3$ [Приказ..., 2016]. Сульфид-ион отнесен к категории «сан-токс» – санитарно-токсикологический (действие вещества на водные биологические ресурсы и санитарные показатели водных объектов рыбохозяйственного назначения); к 3 классу опасности [Приказ..., 2016]. По санитарно-гигиеническим нормам [СанПиН 2.1.4.1074-01] сероводород в воде водоемов питьевого назначения относится к 4 классу опасности – умеренно опасные вещества (величина норматива – $0,003 \text{ мг/л}$).

В подавляющем большинстве случаев процессы образования сероводорода и его окисления находятся в равновесии, за счет чего его токсическое действие в водной толще не проявляется [Тимофеева и др., 1991].

Часто водоемы подвергаются антропогенному воздействию, которое не ограничивается

увеличением содержания сульфатов в воде и ее подкислением. В ряде случаев наблюдается комбинированное загрязнение водных объектов сернистыми соединениями и органическими веществами, а также соединениями азота и фосфора, что приводит к активизации цепочки биологических процессов, включающей первичную продукцию органического вещества, расход кислорода на окисление избыточного органического вещества, к эвтрофикации водоемов, а также к образованию сероводорода в больших количествах за счет активизации деятельности сульфатредуцирующих бактерий в возникших анаэробных условиях [Глобальный..., 1983].

До тех пор, пока в водоеме имеется ресурс реакционноспособного железа, образующийся H_2S связывается нацело на месте. При интенсивном процессе восстановления сульфатов запаса реакционноспособного железа может не хватать [Волков, 1984]. В подобной ситуации сероводород при отсутствии других связывающих элементов и полном исчерпании кислорода в водной толще (особенно в период зимней стагнации) может выходить на поверхность водоема и распространяться в воздушной среде.

Целью данной работы было продолжение комплексных исследований поведения элементов биогеохимического цикла серы в водоемах Европейского Севера России, проведенных нами с 2007 по 2012 г. на территории Кенозерского национального парка.

Материалы и методы

Объект исследования

Национальный парк «Кенозерский» (Кенозерский национальный парк, КНП, НП «Кенозерский») расположен в юго-западной части Архангельской области на стыке Плесецкого и Каргопольского административных районов, его западная граница проходит по границе с Республикой Карелия [Кенозерский...]. На территории парка находится большое количество озер, рек и ручьев, в совокупности представляющих собой существенную и очень важную часть водосборного бассейна рек Онеги и Водлы. По величине водосборной площади 90 % территории парка относится к бассейну Белого моря и лишь 10 % – к бассейну Балтийского. Граница водораздела проходит по поросшей лесом гряде Масельга [Шатковская и др., 2002]. Областью нашего исследования были озера Каргопольского сектора КНП, где проходит граница раздела бассейнов морей.

Озеро Лёкшозеро (водосборный бассейн Белого моря) – второй по величине водоем на

территории КНП и пятый на водосборе р. Онеги. Форма котловины близка к овальной. Береговая линия изрезана очень слабо. Дно ровное, без резких перепадов глубин. Район больших глубин вытянут в виде борозды, смещенной к восточному берегу.

Озеро Масельгское (водосборный бассейн Балтийского моря) – узкий по форме водоем со слабоизрезанной береговой линией, вытянутый в северо-западном направлении. Южная часть озера мелководна, наибольшие глубины отмечаются в северо-восточной и относительно изолированной северо-западной (*Пежихерье*) частях озера. Для рельефа дна оз. Масельгское характерно чередование отмелей и понижений [Воробьева и др., 2013].

Географическое место отбора проб фиксировалось с помощью спутникового определителя координат GPS-навигатора Garmin Etrex10, глубина – с применением эхолота Fishfinder 140. Коллегами из Института экологических проблем Севера (ныне ФИЦКИА УрО РАН) в ходе исследований с 2007 г. определены и установлены морфометрические характеристики изучаемых в настоящей работе озер Масельгское/Пежихерье и Лёкшмозеро. По предоставленным ими координатам мы в марте 2022 г. вышли на самые глубоководные участки указанных водоемов. Расположение станций отбора приведено в таблице 1.

Отбор проб воды и их химический анализ

Пробы воды в марте 2022 г. отбирались послойно на выбранных станциях исследуемых озер с помощью горизонтального поликарбонатного батометра объемом 5 л согласно [ГОСТ 31861-2012]. Объем проб варьировал в зависимости от аликвоты, необходимой для анализа и достаточной для проведения повторного определения. Вода помещалась в емкости из различного материала согласно требованиям хранения определяемых в ней компонентов (растворенный сероводород – в стекло; ионный состав, щелочность, цветность, биогенные эле-

менты, растворенное железо и углерод – в пластик). При отборе воды на анализ растворенного железа по формам создавались условия минимизации контакта с кислородом воздуха. Ввиду отсутствия возможности незамедлительного установления концентраций вышеуказанных соединений их было необходимо консервировать (сероводород – предварительным добавлением ацетата цинка; растворенное железо – подкислением до pH менее 2). Всего в 2022 г. отобрано 144 пробы с шести горизонтов трех озер на различные виды анализа.

Температура и содержание кислорода измерены по всей глубине, начиная подо льдом и до дна, через 0,5 м, с помощью портативного оксиметра HQ30D.99 Nach Lange с люминесцентным датчиком LDO. На основании этих данных были выбраны шесть горизонтов для отбора проб на каждом озере. Гидрохимические показатели (pH, электропроводность) измерены с помощью pH-метра HI 83141 (Hanna) и кондуктометра HI 8733 (Hanna). Определение сероводорода и сульфидов проводили фотометрическим методом на спектрофотометре UNICO 1201. Предел обнаружения составляет 2 мкг/л [РД 52.24.450-2010]. Определение ионного состава (сульфатов, хлоридов, натрия, калия, магния, кальция) проводилось хроматографически на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором [ПНД Ф 14.1:2:4.132-98], щелочности и гидрокарбонатов – по [ГОСТ 31957-2012], цветности – по [ГОСТ 31868-2012]. Жесткость определялась сложением эквивалентных концентраций кальция и магния. Содержание растворенного железа в воде анализировалось фотометрическим методом с феррозином на спектрофотометре UNICO 1201. В качестве восстановителя применялась аскорбиновая кислота. Предел обнаружения составляет 0,05 мкг/л [Кононец и др., 2002; Титова, Кокрятская, 2013]. Содержание биогенных элементов (аммония, нитритов, нитратов, фосфатов, кремния) определяли колориметрическим мето-

Таблица 1. Расположение станций отбора проб воды в озерах на территории НП «Кенозерский»

Table 1. Location of stations for sampling water and bottom sediments in lakes on the territory of the Kenozersky National Park

Озеро Lake	Станция Station	Координаты Coordinates	Высота над уровнем моря, м Height above sea level, m	Глубина, м Depth, m
Масельгское Maselga	MG	61.82848° N 38.03080° E	164	19,5
Пежихерье Pezhikherie	PG	61.82196° N 37.99727° E	167	20,0
Лёкшмозеро Lyokshmozero	LG	61.73413° N 38.08414° E	156	25,0

дом на спектрофотометре UNICO-1201 [Руководство..., 2003]. Минерализация воды (мг/л) для озер рассчитана сложением концентраций главных ионов. Для определения класса воды произведен перерасчет концентраций в мг-экв/л для каждого иона, а также вычислено их процентное соотношение.

Результаты и обсуждение

Протекание биогеохимических процессов цикла серы в воде озер зависит от ряда факторов: морфометрических характеристик водоема (площади, глубины), высоты над уровнем моря; цветности; минерализации и ионного состава, в частности содержания сульфатов; количества органического вещества, растворенного железа и биогенных веществ [Драбкова, Сорокин, 1979; Глобальный..., 1983].

Особенности формирования гидролого-гидрохимических режимов озер обусловлены факторами, связанными с их морфометрическими и гидрографическими характеристиками [Воробьева и др., 2013].

Отношение площади водосбора к площади зеркала С. В. Григорьев [Драбкова, Сорокин, 1979] назвал удельным водосбором. Этот показатель характеризует степень возможного влияния водосбора на жизнь озера и его режим. Условный водообмен (α) представляет собой отношение среднегодового притока с водосбора в озеро к объему самого озера. Он выражает степень приточности вод на режим озера. Малые значения α указывают на слабую роль притока в жизни озера и, как следствие этого, на развитие автохтонного режима в озере, высокие – на

формирование аллохтонного режима, зависящего от водосбора [Драбкова, Сорокин, 1979]. Исследуемые озера являются верховыми, относятся к сточным водоемам с низким коэффициентом условного водообмена и малым удельным водосбором [Воробьева и др., 2013], в них преобладают внутриводоемные гидрохимические процессы [Широкова и др., 2008].

По классификации П. В. Иванова [1948] изученные нами озера по величине их площади (км²) [Морева и др., 2007], располагая классы водоемов в геометрической прогрессии со знаменателем, равным 10, можно отнести к категориям: малые (1–10) – Масельское/Пезихерье (3,44) и средние (10–100) – Лёкшмозеро (53,8).

Величина максимальной глубины (м) озер классифицируется как повышенная (12,5–25): Масельское/Пезихерье (19,5/20) < Лёкшмозеро (25). Сопоставляя максимальную глубину с площадью исследованных нами озер, можно отметить небольшое ее увеличение при значительной разнице в размерах водоемов.

Высота водного зеркала озер над уровнем моря (табл. 1) подтверждает расположение озер на возвышенности, при этом разница между водоемами бассейнов разных морей составляет 8–11 м (водоемы, относящиеся к Балтийскому морю, выше связанных с Белым морем). Значительного снижения уровня воды в изучаемых озерах в 2022 г. не установлено – максимальные глубины схожи с определенными в ходе батиметрических исследований предыдущих лет (с 2007 по 2012 г.).

Во всех озерах наблюдалась обратная температурная стратификация (рис. 1), когда температура поверхностного слоя выше придонного

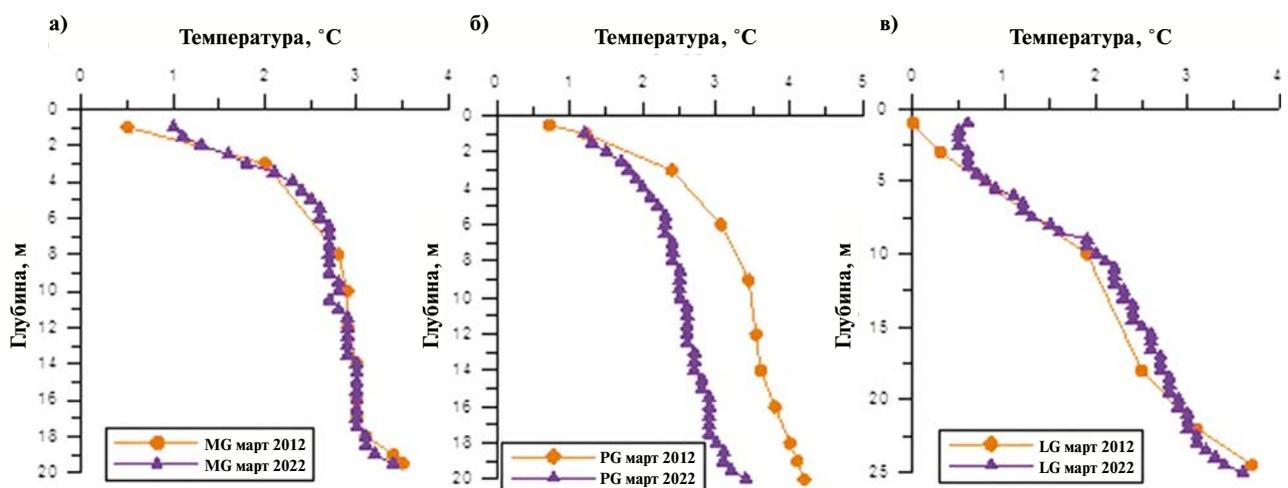


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры в воде озер. Здесь и на рис. 2–5: а) Масельское, б) Пезихерье, в) Лёкшмозеро

Fig. 1. Vertical temperature distribution in lake water.

Here and in Fig. 2–5: а) Maselga, б) Pezhikherie, в) Lyokshmozero

[Хатчинсон, 1969]. Значения температуры и ее изменения по столбу воды были близкими в оба периода исследований для оз. Масельгское и Лёкшмозеро. На градус теплее была вода в оз. Пежихерье в 2012 г. по сравнению с 2022 г., но и это различие незначительное.

Все глубоководные станции исследованных нами озер были так же, как и по температуре, стратифицированы по содержанию кислорода – оно уменьшалось от поверхности ко дну с появлением анаэробных условий (практически полное исчерпание кислорода) (рис. 2).

Граница аэробно-анаэробной зоны для оз. Масельгское приходилась на глубину 14–14,5 м, при этом в 2012 г. остаточное количество кислорода (до 1,5 мг/л) сохранялось в придонном слое воды (рис. 2, а), тогда как в 2022 г. наблюдалось полное его исчерпание. В оз. Пежихерье отмечены идентичные вертикальные изменения содержания кислорода в сравниваемые периоды с его полным исчерпанием на уровне 16–16,5 м (рис. 2, б). Для оз. Лёкшмозеро в 2022 г. переходным горизонтом служила глубина 21–21,5 м, в 2012 г. кислород у самого дна сохранялся в количестве 2 мг/л (рис. 2, в).

Существуют исследования, говорящие о том, что воды озер, расположенных в районах с плоским рельефом и моренным ландшафтом, ледниково-речные и ледниково-озерные образования которого уже по своему происхождению являются хорошо перемытыми, обладают низкой минерализацией [Драбкова, Сорокин, 1979]. По классификации С. П. Китаева [2007] воды исследованных нами озер по усредненным значениям минерализации (мг/л) отнесены к категории «ультрапресные» (<100): Пежихерье (31,5) < Масельгское (38,0) < Лёкшмо-

зеро (72,1). Во всех исследованных озерах содержание главных ионов увеличивалось от поверхностных слоев воды к придонным: оз. Пежихерье – от 32 до 44 мг/л; оз. Масельгское – от 27 до 49 мг/л; наиболее существенные различия выявлены для воды оз. Лёкшмозеро – от 66 до 132 мг/л. Результаты измерения электропроводности подтверждают различия в минерализации воды озер между собой и по водному столбу (табл. 2).

Как следует из данных табл. 2, для всех исследуемых озер доминирующими ионами были гидрокарбонаты (около 90 %) и кальций (около 60 %), что позволяет отнести их воды к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе [Алекин, 1953]. Среди анионов в малых количествах отмечены хлориды и сульфаты. Вторым по значимости катионом был магний (32 %). Наименьшая по усредненному значению жесткость воды установлена для оз. Пежихерье (0,54 ммоль/л), несколько выше – для оз. Масельгское (0,60 ммоль/л) и почти в 2 раза больше – для оз. Лёкшмозеро (1,17 ммоль/л). Для хозяйственного применения допустима вода с жесткостью, не превышающей 7 ммоль/л [СанПиН 2.1.4.1074-01], и по данному показателю воды исследованных озер относятся к категории «очень мягкие» (до 1,5 ммоль/л). Так как содержание почти всех ионов и их суммы (минерализация) увеличивалось от поверхности водоема к его дну, в вертикальном распределении величины жесткости обнаружена аналогичная закономерность. При этом для оз. Масельгского/Пежихерье обе эти величины изменялись по столбу воды незначительно (на 10 мг/л и 0,10 ммоль/л), а для оз. Лёкшмозеро минерализация увеличилась в два раза и жесткость – на 0,5 ммоль/л. Из полученных дан-

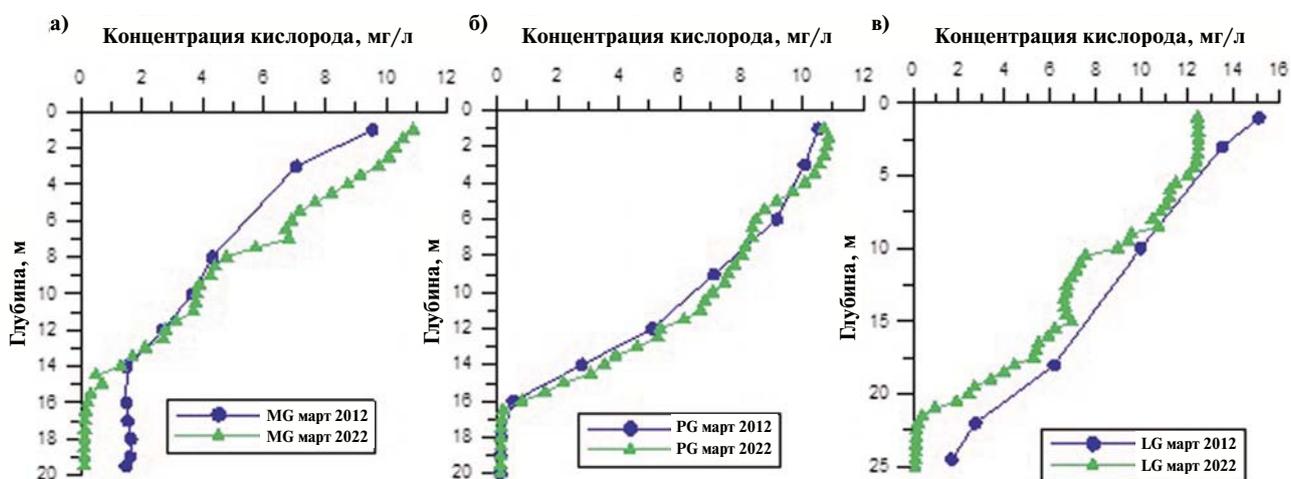


Рис. 2. Вертикальное распределение содержания кислорода в воде озер

Fig. 2. Vertical distribution of oxygen content in lake water

ных следует, что для оз. Лёкшозеро существенным в зимний период является грунтовое питание – разгрузка подземных вод в ложе озера, скорее всего, в виде выхода родников, ключей.

Единственным ионом, содержание которого снижается от поверхностных слоев воды к придонным, являлись сульфаты.

Распределение сульфатов в воде изученных озер (за исключением оз. Пижихерье) показывает некоторое снижение их концентрации к придонным слоям в оба периода исследований (рис. 3). Содержание сульфатов было практически одинаковым для озер Пижихерье и Лёкшозеро (рис. 3, б, в). Для воды

Таблица 2. Концентрация основных ионов в воде исследуемых озер в марте 2022 г.

Table 2. Concentration of the main ions in the water of the studied lakes in March 2022

Озеро Lake	Единицы измерения Units	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l
Масельгское Maselga	мг/л mg/l	24,70* 18,91-34,16	0,49 0,45-0,63	1,15 0,52-1,26	1,08 0,99-1,23	7,74 7,20-9,89	2,56 2,45-2,78	0,46 0,42-0,60	38,18
	мг-экв/л mg-eq/l	0,40 0,31-0,56	0,01 0,01-0,02	0,02 0,01-0,03	0,05 0,04-0,05	0,39 0,36-0,49	0,21 0,20-0,23	0,01 0,01	
	%-экв**	91,55 88,84-92,55	3,12 2,63-3,78	5,33 2,15-7,52	7,24 5,52-8,32	58,66 56,95-63,38	32,32 29,69-32,52	1,76 1,41-2,43	
Пижихерье Pezhikherie	мг/л mg/l	19,22 14,60-35,04	0,43 0,42-0,51	1,16 0,73-1,37	1,01 0,94-1,06	6,99 6,73-8,36	2,34 2,24-2,39	0,46 0,40-0,58	31,61
	мг-экв/л mg-eq/l	0,32 0,24-0,58	0,01 0,01	0,02 0,02-0,03	0,04 0,04-0,05	0,35 0,34-0,42	0,20 0,19-0,20	0,01 0,01	
	%-экв	89,96 84,83-95,55	3,47 1,95-5,08	6,57 2,51-10,09	7,21 6,44-7,92	58,52 57,81-61,88	32,28 29,48-32,62	1,95 1,70-2,20	
	%-eq								
Лёкшозеро Lyokshozero	мг/л mg/l	47,58 43,31-100,04	0,64 0,53-0,97	1,23 0,71-1,40	1,93 1,84-2,85	15,18 13,83-19,71	4,99 4,57-7,10	0,55 0,50-0,67	72,1
	мг-экв/л mg-eq/l	0,78 0,71-1,64	0,02 0,01-0,03	0,03 0,01-0,03	0,09 0,08-0,12	0,76 0,69-0,99	0,42 0,38-0,59	0,01 0,01-0,02	
	%-экв	94,80 93,95-97,50	2,05 1,62-2,50	3,15 0,88-3,56	6,70 6,44-7,22	59,60 57,41-59,65	32,60 32,36-34,46	1,10 0,91-1,27	
	%-eq								

Примечание. *В числителе – среднее значение (медиана), в знаменателе – минимальное-максимальные значения; **%-экв рассчитан от суммы анионов и катионов раздельно.

Note. *In the numerator – average value (median), in the denominator – minimum-maximum values; **%-eq is calculated from the sum of anions and cations separately.

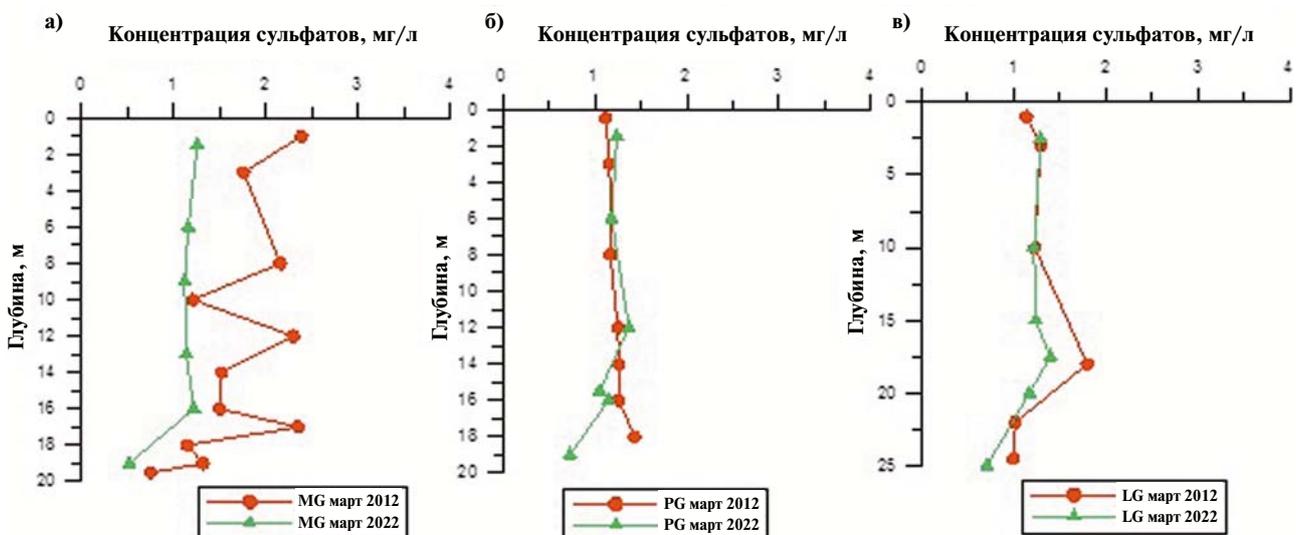


Рис. 3. Вертикальное распределение содержания сульфатов в воде озер

Fig. 3. Vertical distribution of sulfate content in lake water

оз. Масельгское отмечены чуть большие концентрации сульфатов в 2012 г. и неравномерное изменение их содержания по столбу воды (рис. 1, а). Небольшое увеличение отмечено для горизонтов 12 и 17 м в 2012 г. и 16 м в 2022 г.

Стоит упомянуть, что на уровне 12 м в оз. Масельгское зафиксирован максимум содержания сульфатов по сравнению с прилегающими слоями водной толщи, в 2 раза превышающий среднюю концентрацию этих ионов в верхних слоях воды данной глубоководной станции. Эта особенность связана, предположительно, с деятельностью фототрофных серных бактерий, окисляющих диффундирующий сероводород, в том числе и до сульфатов. Подтверждением может служить тот факт, что в проведенных нами ранее исследованиях для глубоководной станции оз. Масельгское зафиксировано присутствие небольшого количества элементарной серы в аэробной зоне. Эта форма серы образуется непосредственно в результате окисления сероводорода. Указанный горизонт воды расположен между аэробной и анаэробной зонами (микроаэрофильная зона) и служит нижней границей фотического слоя, то есть здесь создаются условия, оптимальные для развития данного вида микроорганизмов. Для оз. Лёкшмозеро таким горизонтом является глубина 16 м. В обоих случаях над граничными слоями наблюдалось некоторое снижение содержания кислорода и отклонение тенденции исчерпания кислорода от прямой линии (рис. 2, а, в). Так как в ходе исследований отмечено наличие анаэробных

условий в нижних слоях воды всех исследованных озер и снижение количества сульфатов, то в них можно ожидать протекание процесса сульфатредукции.

Значения pH воды всех исследованных нами озер близки к нейтральной среде (в среднем от 6,90 до 6,95). Такие условия благоприятствуют жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий [Волков, 1984]. В аэробной зоне концентрация сероводорода была минимальная (рис. 4), что вполне закономерно, поскольку сульфатредуцирующие бактерии осуществляют свою жизнедеятельность в анаэробных условиях. ПДК этого показателя для водоемов рыбохозяйственного назначения составляет 5 мкг/л [Приказ..., 2016]. В бескислородных условиях изученных озер в 2022 г. отмечено следующее содержание сероводорода: оз. Масельгское – до 50 мкг/л, оз. Пежихерье – до 100 мкг/л и небольшое количество в оз. Лёкшмозеро – до 12 мкг/л (рис. 4). Для глубоководных станций озер Масельгское и Пежихерье не отмечено снижения количества сероводорода в придонных слоях, в оз. Лёкшмозеро его количество за прошедший период осталось незначительным.

На протекание микробиологических процессов существенное влияние также оказывает цветность воды. Этот показатель для оз. Лёкшмозеро изменялся незначительно, от 3 до 10 градусов вплоть до дна, для оз. Масельгское и Пежихерье изменения окраски воды были от 27 до 54 и от 30 до 38 градусов соответственно. Исследованные нами озера по степени окрашенности (град.) их вод

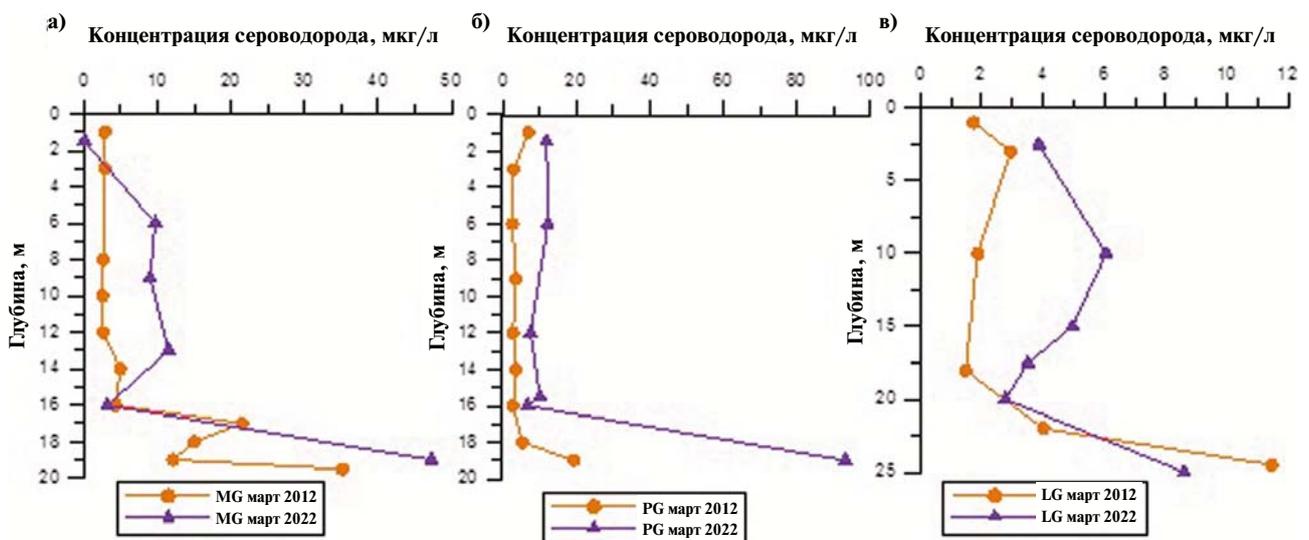


Рис. 4. Вертикальное распределение содержания сероводорода в воде озер
Fig. 4. Vertical distribution of hydrogen sulfide content in lake water

без учета придонных слоев по [Фортунатов, 1959] относились к следующим группам: почти лишённые окраски (0–19) – озеро Лёкшмозеро; слабоокрашенные (20–40) – оз. Пижихерье, среднеокрашенные (40–59) – оз. Масельгское. Но в придонных слоях цветность воды озера Масельгское и Пижихерье значительно возрастала – до 205 и 100 градусов соответственно, и такие воды можно отнести уже к категориям: темноокрашенные (100–199) – оз. Пижихерье и исключительно темноокрашенные (более 200) – оз. Масельгское. Таким образом, наиболее окрашенными были воды оз. Масельгское. Как известно, цветность воды определяется в основном содержанием органического вещества (гуминовых кислот) и железа. По общему содержанию растворенного органического углерода, по которому оценивалась величина содержания органического вещества, воды всех исследованных нами озер относились к категориям с низким и средним его содержанием [Китаев, 2007]. При этом во всех озерах наблюдалось увеличение концентраций углерода (мг/л) от поверхностных слоев к придонным: от 5 до 9 (среднее содержание 4,50) в оз. Лёкшмозеро, от 8 до 12 (9,48) в оз. Масельгское, от 9 до 12 (9,87) в оз. Пижихерье. Рассматривая корреляционную взаимосвязь между цветностью и содержанием органического вещества, можно отметить, что наименьшее влияние этот показатель оказывает на окраску воды оз. Лёкшмозеро ($r^2 = 0,50$), существенное влияние – оз. Масельгское ($r^2 = 0,89$) и почти полностью обуславливает цвет воды оз. Пижихерье ($r^2 = 0,97$);

остальной вклад в цветность вносят соединения железа.

Концентрация растворенного железа во всех озерах в аэробной зоне не превышала 400 мкг/л (рис. 5), при этом в анаэробной зоне содержание железа резко возрастало и практически на 100 % было представлено восстановленной его формой. Максимальное количество железа зафиксировано в придонном слое оз. Масельгское (рис. 5, а) в оба периода исследований. В 2012 г. эта величина достигала 38 000 мкг/л. Возможно, в это значение вносят вклад некие методические ошибки отбора, например, попадание в растворенную фракцию более крупных коллоидных частиц, но доминирование в этой величине восстановленной формы железа все-таки говорит о близости результата к достоверному. В 2022 г. эта величина снизилась до 17 000 мкг/л, но все еще остается очень большой. Для оз. Пижихерье содержание железа в придонном слое, напротив, увеличилось от 2000 до 5500 мкг/л (рис. 5, б). В оз. Лёкшмозеро концентрация растворенного железа достигала значений 1250 мкг/л (рис. 5, в). Во всех исследованных нами озерах Архангельской области содержание железа не превышало 1000 мкг/л. Значительное количество (до 6000 мкг/л) его было обнаружено в воде оз. Нижнее (Коношский район), испытывающего антропогенное воздействие, результатом которого является создание строго анаэробных условий в придонном слое воды [Титова и др., 2015], и оз. Светлое, где в придонных слоях (глубина 39 м) содержание железа возрастает до 12 000 мкг/л [Кокрятская и др., 2019],

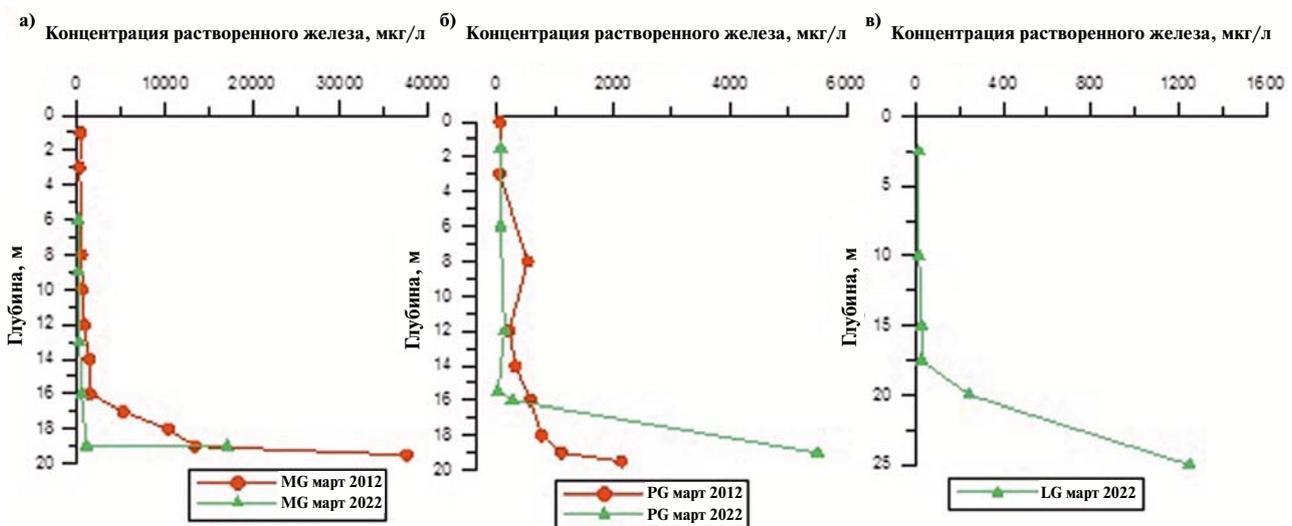


Рис. 5. Вертикальное распределение содержания растворенного железа в воде озер
 Fig. 5. Vertical distribution of dissolved iron content in lake water

но этот водоем является уникальным меромиктическим специфического железо-марганцевого типа [Чупаков и др., 2013].

В ходе гидрохимических исследований 2007–2012 гг. установлено, что в воде исследованных озер Кенозерского национального парка существует довольно устойчивая пространственно-временная цикличность динамики содержания соединений азота [Воробьева и др., 2012]. Значения средневзвешенных концентраций общего азота и фосфора колеблются в пределах, характерных для мезотрофных водоемов [Воробьева и др., 2013].

Среднее содержание минерального фосфора в марте 2022 г. было наименьшим в оз. Пежихерье – 3 мкг/л, немного выше в оз. Лёкшмозеро – 5 мкг/л (для обоих озер изменялось незначительно по водному столбу) и в оз. Масельгское – 9 мкг/л, но в придонном слое этого водоема его количество достигало 49 мкг/л. В озерах Пежихерье и Лёкшмозеро почти весь фосфор был связан с органическим веществом, на долю минерального фосфора (фосфатов) приходилось 7 и 16 % от общего его содержания даже в придонных слоях воды. В оз. Масельгское в аэробной зоне около 50 % фосфора связано с органическим веществом, а в анаэробном слое почти весь фосфор был в минеральной форме (96 %). Согласно [Приказ..., 2016] в водоемах рыбохозяйственного назначения количество фосфатов не должно превышать 50 мкг/л (для олиготрофных водоемов) и 150 мкг/л (для мезотрофных), следовательно, превышения ПДК не зафиксировано. По максимальному содержанию общего фосфора (мкг/л) [Китаев, 2007, 2012] трофность исследуемых нами озер классифицируется следующим образом: олиготрофные (6,25–25) – оз. Лёкшмозеро, Пежихерье; α -мезотрофные (25–49) – оз. Масельгское.

Общее содержание минеральных форм азота (как и их составляющих) в воде всех исследованных озер увеличивалось от поверхностных горизонтов к придонным (мкгN/л): для оз. Лёкшмозеро – от 104 до 1373, оз. Масельгское – от 360 до 1500 и оз. Пежихерье – от 157 до 404. В аэробных условиях всех озер доминирующей формой среди минеральных соединений выступали нитраты. В придонных бескислородных слоях отмечена тенденция увеличения содержания ионов аммония – в озерах Пежихерье и Лёкшмозеро его концентрация была немного меньше по сравнению с нитратами, а для оз. Масельгское – почти в 2 раза больше (790 и 420 мкгN/л соответственно). Во всех исследованных озерах в направлении ко дну снижается содержание

органических форм азота и его доля от общего содержания азота в воде, при этом доля минеральных форм возрастает до 80–93 %.

Используя максимальное содержание общего азота (мкгN/л) в качестве критерия, исследованные водоемы по уровню трофности можно классифицировать так [Китаев, 2007, 2012]: α -мезотрофные (650–1300) – оз. Пежихерье (1100); эвтрофные (1300–2600) – оз. Масельгское и Лёкшмозеро (1500 и 1470). По усредненным значениям этого показателя озера относятся к мезотрофным водоемам. Содержание кремния также увеличивается к придонным слоям, при этом в оз. Лёкшмозеро его количество у дна почти в 2 раза выше, чем в озерах Масельгское и Пежихерье (4600 и 2100 мкг/л соответственно).

Заключение

В ходе исследований, направленных на выявление специфики поведения элементов биогеохимического цикла серы в воде озер Кенозерского национального парка в зимний период, получены следующие результаты. Границы аэробно-анаэробных зон в воде озер и трофический статус водоемов после завершения исследований 2007–2012 гг. практически не изменились. В межгодовом аспекте увеличилось содержание сероводорода в придонных слоях озер Масельгское и Пежихерье. Отмечено протекание процессов анаэробной минерализации органического вещества по содержанию сероводорода и аммония, наиболее активны они в придонных слоях оз. Масельгское. Для сохранения экосистем исследованных озер в таком же состоянии и во избежание ухудшения ситуации следует обратить внимание на глубоководные участки оз. Масельгское и проводить периодические исследования.

Авторы благодарят директора национального парка «Кенозерский» Е. Ф. Шатковскую за возможность проведения исследований и пользования ресурсами парка, а также сотрудников парка за помощь в экспедиционных работах.

Литература

Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1953. 296 с.

Беляев С. С., Леин А. Ю., Иванов М. В. Роль метанообразующих и сульфатредуцирующих бактерий в процессах деструкции органического вещества // Геохимия. 1981. № 3. С. 437–445.

Волков И. И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.

Воробьева Т. Я., Морева О. Ю., Собко Е. И., Широкова Л. С., Забелина С. А., Климов С. И., Шорина Н. В., Покровский О. С., Ершова А. А., Чулаков А. В. Оценка экологического состояния озер Кенозерского национального парка (Архангельская область) // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 3(2). С. 825–831.

Воробьева Т. Я., Ершова А. А., Морева О. Ю., Чулаков А. В., Забелина С. А., Климов С. И. Микробиологические и гидрохимические аспекты круговорота азота в озерах Кенозерского национального парка // Вестник САФУ. 2012. № 4. С. 13–21.

Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека / Ред. акад. Г. К. Скрябин. М.: Наука, 1983. 424 с.

ГОСТ 31861–2012. Вода. Общие требования к отбору. Введен 2012-11-25. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

ГОСТ 31868–2012. Вода. Методы определения цветности. Введен 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

ГОСТ 31957–2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. Введен 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2013. 30 с.

Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.

Иванов П. В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Вестник ЛГУ. 1948. № 21. С. 29–36.

Кенозерский национальный парк. Общая информация. [Электронный ресурс] URL: <http://www.kenozero.ru/o-parke/materialy/obshchaya-informatsiya/> (дата обращения: 15.12.2022).

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 395 с.

Китаев С. П. Типизация озерных экосистем по трофическому статусу // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Мат-лы всерос. симпоз. с междунар. участием (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск, 2012. С. 387–391.

Кокрятская Н. М., Чулаков А. В., Титова К. В., Чулакова А. А., Забелина С. А., Морева О. Ю., Неверова Н. В., Жибарева Т. А. Гидролого-гидрохимические характеристики меромиктического железо-марганцевого пресноводного озера Светлое (Архангельская область) // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биол. 2019. Т. 12, № 2. С. 147–159. doi: 10.17516/1997-1389-0036

Кононец М. Ю., Пахомова С. В., Розанов А. Г., Проскурнин М. А. Определение растворенных форм железа в морской воде с помощью феррозина // Журнал аналитической химии. 2002. Т. 57, № 7. С. 704–708.

Кузнецов С. И. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 300 с.

Морева О. Ю., Климов С. И., Воробьева Т. Я. Гидролого-гидрохимические исследования озер южной части Кенозерского национального пар-

ка // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития: Мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: в 2 ч. Вып. 5. (Киров, 27–29 ноября 2007 г.). Киров, 2007. С. 59–63.

Намсараев Б. Б., Земская Т. И. Микробиологические процессы круговорота углерода в донных осадках озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 160 с.

ПНД Ф 14.1:2:4.132-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. Введен 1998-04-02. Переиздан 2008-01-01. М.: Гос. комитет РФ по охране окр. среды, 2008. 21 с.

Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 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». (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203). М.: Минсельхоз, 2016. 91 с.

РД 52.24.450-2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2010. 50 с.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Введен впервые 2002-01-01. М.: Минздрав РФ, 2001. 61 с.

Тимофеева С. С., Ошаров А. Б., Бейм А. М. Экологическая химия сернистых соединений. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1991. 134 с.

Титова К. В., Кокрятская Н. М. Оптимизация методики определения растворенного железа с использованием феррозина в пресноводных озерах // Вода. Химия и экология. 2013. № 10. С. 85–89.

Титова К. В., Кокрятская Н. М., Панова Т. А. Процесс сульфатредукции в воде гидрографически связанных озер Нижнее и Верхнее (Архангельская область), отличающихся степенью антропогенной нагрузки // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: Мат-лы науч. конф. с междунар. участием. Часть 1. (Ростов-на-Дону, 8–10 сент. 2015 г.). Ростов-на-Дону, 2015. С. 127–131.

Фортунатов М. А. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатель его режима // Труды Ин-та биологии водохранилищ АН СССР. 1959. Вып. 2(25). С. 246–357.

Хатчинсон Д. Лимнология: Географические, физические и химические характеристики озер / Пер. с англ. Г. В. Цыцарина и Г. Г. Шинкар. М.: Прогресс, 1969. 592 с.

Чупаков А. В., Покровский О. С., Широкова Л. С., Воробьева Т. Я., Забелина С. А., Кокрятская Н. М., Морева О. Ю., Ершова А. А., Шорина Н. В., Климов С. И. Гидрохимические особенности пресноводного меромиктического оз. Светлое (Архангельская область) // Вестник САФУ. 2013. № 1. С. 20–31.

Шатковская Е. Ф., Торхов С. В., Тормосов Д. В., Синяговский С. А., Козыкин А. В., Болотов И. Н., Хохлова Т. Ю. Природное и культурное наследие Кенозерского национального парка: сб. науч. ст. Петрозаводск: ПетроПресс, 2002. 175 с.

Широкова Л. С., Воробьева Т. Я., Забелина С. А., Морева О. Ю., Климов С. И. Характеристика продукционно-деструкционных процессов малых озер Архангельской области // Современные проблемы науки и образования. 2008. № 5. С. 17–24.

References

Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1953. 296 p. (In Russ.)

Belyaev S. S., Lein A. Yu., Ivanov M. V. The role of methane-forming and sulfate-reducing bacteria in the processes of organic matter degradation. *Geokhimiya = Geochemistry*. 1981;3:437–445. (In Russ.)

Chupakov A. V., Pokrovskii O. S., Shirokova L. S., Vorob'eva T. Ya., Zabelina S. A., Kokryatskaya N. M., Moreva O. Yu., Ershova A. A., Shorina N. V., Klimov S. I. Hydrochemical features of freshwater meromictic Lake Svetloe (Arkhangelsk Region). *Vestnik SAFU = Bulletin of NArFU*. 2013;1:20–31. (In Russ.)

Drabkova V. G., Sorokin I. N. The lake and its catchment are a single natural system. Leningrad: Nauka; 1979. 195 p. (In Russ.)

Fortunatov M. A. Chromaticity and transparency of the water of the Rybinsk Reservoir as an index of its regime. *Trudy In-ta biologii vodokhranilishch AN SSSR = Transactions of the Institute of Biology of Water Reservoirs of the USSR Academy of Sciences*. 1959;2(25):246–357. (In Russ.)

GOST 31861–2012. Water. General requirements for sampling. Introduced 25.11.2012. Moscow: Standartinform; 2013. 36 p. (In Russ.)

GOST 31868–2012. Water. Methods for determination of colour. Introduced 01.01.2014. Moscow: Standartinform; 2019. 12 p. (In Russ.)

GOST 31957–2012. Water. Methods for determination of alkalinity and mass concentration of carbonates and hydrocarbonates. Introduced 01.01.2014. Moscow: Standartinform; 2013. 30 p. (In Russ.)

Guidance on the chemical analysis of marine and fresh waters in the ecological monitoring of fishery reservoirs and promising areas for fishing in the World Ocean. Moscow: VNIRO; 2003. 202 p. (In Russ.)

Hutchinson D. Limnology: Geographical, physical and chemical characteristics of lakes. Moscow: Progress; 1969. 592 p. (In Russ.)

Ivanov P. V. Classification of lakes by size and by their average depth. *Vestnik LGU = Bulletin of Leningrad State University*. 1948;21:29–36. (In Russ.)

Kenozersky National Park. General information. URL: <http://www.kenozero.ru/o-parke/materialy/obshchaya-informatsiya> (accessed: 12.15.2022). (In Russ.)

Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 395 p. (In Russ.)

Kitaev S. P. Typification of lake ecosystems by trophic status. *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh: Mat-ly vseros. simp. s mezhdunar. uchastiyem (Petrozavodsk, 10-14 sent. 2012 g.) = Organic matter and biogenic elements in inland waters and marine waters: Proceedings of the All-Russian symposium with international participation (Petrozavodsk, Sept. 10-14, 2012)*. Petrozavodsk; 2012. P. 387–391. (In Russ.)

Kokryatskaya N. M., Chupakov A. V., Titova K. V., Chupakova A. A., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Neverova N. V., Zhibareva T. A. Hydrological and hydrochemical characteristics of meromictic iron-manganese freshwater Lake Svetloe (Arkhangelsk Region). *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Ser. Biologiya = Journal of the Siberian Federal University. Biology Series*. 2019;12(2):147–159. doi: 10.17516/1997-1389-0036 (In Russ.)

Kononets M. Yu., Pakhomova S. V., Rozanov A. G., Proskurnin M. A. Determination of dissolved forms of iron in sea water using ferrozine. *Zhurnal analiticheskoi khimii = Journal of Analytical Chemistry*. 2002;57(7): 704–708. (In Russ.)

Kuznetsov S. I. The role of microorganisms in the cycle of substances in lakes. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1952. 300 p. (In Russ.)

Moreva O. Yu., Klimov S. I., Vorobieva T. Ya. Hydrological and hydrochemical studies of the lakes of the southern part of the Kenozersky National Park. *Problemy regional'noi ekologii v usloviyakh ustoychivogo razvitiya: Mat-ly vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem: v 2 ch. Vyp. 5. (Kirov, 27-29 noyabrya 2007 g.) = Problems of regional ecology in the context of sustainable development: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation: in 2 parts. Iss. 5. (Kirov, 2007, Nov. 27-29, 2007)*. Kirov; 2007. P. 59–63. (In Russ.)

Namsaraev B. B., Zemskaya T. I. Microbiological processes of carbon cycle in the bottom sediments of Lake Baikal. Novosibirsk: SO RAN, Geo; 2000. 160 p. (In Russ.)

Order of the Ministry of Agriculture of Russia N 552 dated December 13, 2016 'On approval of water quality standards water bodies of fishery significance, including the standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance' (Registered in the Ministry of Justice of Russia on January 13, 2017 N 45203). Moscow: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 2016. 91 p.

PND F 14.1:2:4.132-98. Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring the mass concentration of anions: nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate and phosphate in samples of natural, drinking and waste water using ion chromatography. Introduced 02.04.1998-04-02. Rev. 01.01. 2008. Moscow; 2008. 21 p. (In Russ.)

RD 52.24.450-2010. Mass concentration of hydrogen sulfide and sulfides in waters. Methods of measurement using photometric method with N, N-dimethyl-

n-phenylenediamine. Rostov-on-Don: Roshydromet, 2010. 50 p. (In Russ.)

SanPiN 2.1.4.1074–01. Drinking water. Hygienic regulations of the water quality of centralized drinking water supply system. Quality control. Sanitary and epidemiological rules and regulations. Introduced 01.01.2002. Moscow: Ministry of Health of the RF, 2001. 61 p. (In Russ.)

Shatkovskaya E. F., Torkhov S. V., Tormosov D. V., Sinyagovskii S. A., Kozykin A. V., Bolotov I. N., Khokhlova T. Yu. Natural and cultural heritage of the Kenozersky National Park: collected papers. Petrozavodsk: Petro-Press; 2002. 175 p. (In Russ.)

Shirokova L. S., Vorob'eva T. Ya., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Klimov S. I. Description of production-destructive processes of small lakes in the Arkhangelsk Region. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = *Current Issues of Science and Education*. 2008;5: 17–24. (In Russ.)

Skryabin G. K. (ed). Global biogeochemical cycle of sulfur and the impact of human activity on it. Moscow: Nauka; 1983. 424 p. (In Russ.)

Timofeeva S. S., Osharov A. B., Beim A. M. Ecological chemistry of sulfur compounds. Irkutsk: Irkutsk Univ.; 1991. 134 p. (In Russ.)

Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Optimization of the method for determining dissolved iron in freshwater lakes with the use of ferrozine. *Voda. Khimiya i ekologiya* = *Water. Chemistry and Ecology*. 2013;10:85–89. (In Russ.)

Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Panova T. A. The process of sulfate reduction in the water of hydrographically connected Lakes Lower and Upper (Arkhangelsk Region), differing in the degree of anthropogenic load. *Sovremennye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod: Mat. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem. Chast' 1. (Rostov-na-Donu, 8-10 sent. 2015 g.)* = *Current issues of hydrochemistry and monitoring of surface water quality: Proceedings scientific conference with international participation. Part 1. (Rostov-on-Don, Sept. 8-10, 2015)*. Rostov-on-Don; 2015. P. 127–131. (In Russ.)

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

Vorob'eva T. Ya., Ershova A. A., Moreva O. Yu., Chupakov A. V., Zabelina S. A., Klimov S. I. Microbiological and hydrochemical aspects of the nitrogen cycle in the lakes of the Kenozero National Park. *Vestnik SAFU = Bulletin of NArFU*. 2012; 4:13–21. (In Russ.)

Vorob'eva T. Ya., Moreva O. Yu., Sobko E. I., Shirokova L. S., Zabelina S. A., Klimov S. I., Shorina N. V., Pokrovskii O. S., Ershova A. A., Chupakov A. V. Evaluation of the ecological state of the lakes of the Kenozersky National Park (Arkhangelsk Region). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(3-2): 825–831. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 30.01.2023; принята к публикации / accepted: 27.04.2023.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Титова Ксения Владимировна

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

e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Кокрятская Наталья Михайловна

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

e-mail: nkokr@yandex.ru

Попов Сергей Сергеевич

младший научный сотрудник лаборатории
экоаналитических исследований

e-mail: sergey.sergeevich20@gmail.com

Морева Ольга Юрьевна

научный сотрудник лаборатории пресноводных
и морских экосистем

e-mail: mapycr1@yandex.ru

Брагин Альберт Владимирович

начальник отдела изучения и интерпретации историко-
культурного наследия

e-mail: birdkenozero@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Titova, Ksenia

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Eco-analytics
Laboratory

Kokryatskaya, Natalia

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

Popov, Sergey

Junior Researcher, Eco-analytics Laboratory

Moreva, Olga

Researcher, Laboratory of Freshwater and Marine Ecosystems

Bragin, Albert

Head of the Department for the Study and Interpretation of
Historical and Cultural Heritage

УДК 504.3.054

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАЛЛОВ В ПСКОВСКОМ ОЗЕРЕ

Г. Т. Фрумин^{1*}, Е. С. Негодина²

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

² Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского
института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга)
(наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053)

Природные водные объекты, расположенные в различных географических зонах России, характеризуются широким диапазоном изменчивости гидрохимических показателей качества воды. Несмотря на это, для всей территории нашей страны установлены единые общедеревальные нормативы качества воды (ПДК), не учитывающие природное своеобразие бассейна, в пределах которого находятся водные объекты и происходит процесс формирования количественных и качественных показателей качества их вод. Оценка качества поверхностных вод на основе общедеревальных ПДК полностью игнорирует не только уникальность водосборов, но и их естественное природное разнообразие. Возникает противоречие, когда концентрации некоторых химических веществ, при которых обеспечена устойчивость сложившихся биоценозов, не соответствуют предельно допустимым концентрациям для водоемов рыбохозяйственного использования (ПДК_{рх}), являющимся нормативами при регулировании качества вод практически всех водных объектов России. В статье приводится обоснование региональных концентраций металлов в Псковском озере. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования системы ПДК для Псковского озера, имеющего рыбохозяйственное значение. На основе данных гидрохимического мониторинга за период 2000–2021 гг. представлены результаты расчетов региональных предельно допустимых концентраций (ПДК_{рег}) шести металлов (железо общее, медь, свинец, марганец, кадмий, цинк). Расчеты выполнены тремя различными методами: С. А. Патиной, Д. Г. Замолотчикова и Е. В. Веницианова с соавторами. В расчетах по методу С. А. Патиной использовались два показателя – средняя концентрация химического элемента за рассматриваемый период и стандартное отклонение. Расчеты по методу Д. Г. Замолотчикова базировались на показателях верхнего и нижнего квартилей распределения. В расчетах по методу Е. В. Веницианова и соавторов применялись объем выборки, верхний квартиль распределения и среднеквадратическое отклонение для квантиля порядка 0,75. На основе принципа санитарного максимализма выявлен оптимальный метод расчета региональных предельно допустимых концентраций металлов – метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами. Установлена весьма высокая теснота связи между региональными предельно допустимыми концентрациями металлов в Псковском озере и их кларками в земной коре.

Ключевые слова: Псковское озеро; металлы; экологическое нормирование; принцип санитарного максимализма; кларки

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Негодина Е. С. Региональные предельно допустимые концентрации металлов в Псковском озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 66–72. doi: 10.17076/lim1760

G. T. Frumin^{1*}, E. S. Negodina². REGIONAL MAXIMUM PERMISSIBLE CONCENTRATIONS OF METALS IN LAKE PSKOVSKOYE

¹Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Nab. R. Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia), *gfrumin@mail.ru

²St. Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fishery and Oceanography ('GosNIORH' named after L. S. Berg) (26 Nab. Makarova, 199053 St. Petersburg, Russia)

Natural water bodies located in different geographical regions of Russia vary widely in hydrochemical indicators of water quality. Despite this, unified federal water quality standards (MPCs) have been established for the entire territory of our country, without taking into account the formation process of quantitative and qualitative indicators of water quality in water bodies or respecting the natural uniqueness of the basins in which they are formed. The assessment of the surface water quality on the basis of federal maximum concentration limits completely ignores not only the specific and unique features of catchments but also their natural diversity. A collision arises when the concentrations of certain compounds do not interfere with the stability of the existing biocoenoses but fail to meet the maximum permissible concentrations for reservoirs used for fisheries (MPC), which apply to almost all water bodies in Russia. The purpose of this study is to substantiate the regional concentrations of metals in Lake Pskovskoye. The relevance of the study is due to the need to improve the MPC system for Lake Pskovskoye, which has a fishery value. The calculations were performed with hydrochemical monitoring data for the period 2000–2021. The results of the calculations of regional maximum permissible concentrations (MPCREG) for six metals (total iron, copper, lead, manganese, cadmium, zinc) are presented. Three different methods were used for the calculations: suggested by S. A. Patina, by D. G. Zamolodchikov, and by E. V. Venitsianov and co-authors. Calculations by Patina's method involve two attributes - the average concentration of a chemical element for the period under review and the standard deviation. Calculations by the method of D.G. Zamolodchikov were based on the upper and lower quartiles of the distribution. The method of E.V. Venitsianov and co-authors employs three attributes - the sample size, the upper quartile of the distribution, and the standard deviation for the quantile of about 0.75. Proceeding from the principle of sanitary maximalism, we argue that the optimal method for calculating metal MPCREGs is the method suggested by E. V. Venitsianov and co-authors. The regional maximum permissible concentrations of metals in Lake Pskovskoye proved to tightly correlate with their Clarke numbers in the earth's crust.

Keywords: Lake Pskovskoye; metals; environmental regulation; principle of sanitary maximalism; Clarke number

For citation: Frumin G. T., Negodina E. S. Regional maximum permissible concentrations of metals in Lake Pskovskoye. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 66–72. doi: 10.17076/lim1760

Введение

Псковско-Чудской озерный комплекс по площади водной поверхности (3555 км²) входит в число крупнейших водных объектов Европы. Этот комплекс состоит из трех частей (озер), различающихся по ряду лимнологических показателей: северной – Чудского,

южной – Псковского и соединяющего их пролива – Теплого озера. Это трансграничный водоем, 56 % площади которого принадлежит России, 44 % – Эстонии. Псковское озеро почти полностью располагается на территории РФ.

Псковское озеро – крупный пресноводный водоем. Его высота над уровнем моря 30 м, площадь озера 708 км², объем воды 2,68 км³,

средняя глубина 3,8 м, наибольшая глубина 5,3 м, длина береговой линии 177 км, соотношение эстонской и российской частей акватории 1 : 99 [Псковско-Чудское..., 2012].

В отличие от других озер (Чудского и Тепло-го) Псковское озеро характеризуется меньшей площадью, относительной мелководностью, повышенной цветностью (58° Pt-Co шкалы) и высоким содержанием биогенных элементов и органических веществ.

По трофическому статусу Псковское озеро оценивается как эвтрофный водоем с признаками гипертрофии, Теплое озеро – как переходящий к гиперэвтрофному, Чудское – мезотрофно-эвтрофный водоем.

Отличительной особенностью Псковского озера является уникально высокая для озер умеренной зоны биологическая, и в частности, рыбопродуктивность (до 3–4 т/км²).

Выбор металлов в качестве предмета исследования обусловлен тем, что они являются приоритетными (наиболее значимыми) веществами, загрязняющими Псковское озеро. К примеру, со стоком реки Великая (главный приток Псковского озера) в 2020 г. в указанный водоем поступило 2969 т железа общего, 522 т марганца, 40 т меди, 203 т цинка, около 1 т кадмия и 9,6 т свинца.

Примерно с 1990-х годов система предельно допустимых концентраций вредных веществ в водных объектах, имеющих рыбохозяйственное значение (ПДК_{рх}), подвергается аргументированной критике, подробно изложенной в ряде работ [Дмитриев, 1994; Волков и др., 1996; Левич, Терехин, 1997; Никаноров и др., 1988; Лозовик, 1998; Фрумин, 1998; Гагарина, 2012; Рисник и др., 2013; Строков, 2014; Фрумин, 2015; Моисеенко, 2017]. К примеру, федеральные ПДК_{рх} не учитывают специфику функционирования водных экосистем в различных природно-климатических зонах и биогеохимических провинциях (естественные геохимические аномалии с различным уровнем содержания природных соединений).

Цель исследования заключалась в обосновании региональных предельно допустимых концентраций металлов в Псковском озере – ПДК_{РЕГ} (regional maximum allowable concentrations – RMAC).

Материалы и методы

Для расчетов ПДК_{РЕГ} металлов в Псковском озере использованы первичные данные гидрохимического мониторинга за период 2000–2021 гг. из материалов СЗ УГМС. Отбор проб воды проводился в четырех створах (18, 19, 20, 39) (рис. 1).

Для расчетов ПДК_{РЕГ} использованы три различных метода, разработанные С. А. Патиным [1979], Д. Г. Замолодчиковым [1993] и Е. В. Венициановым с соавторами [2015] (табл. 1).

Значения N, C_{CP}, σ, ВК и НК для металлов в Псковском озере за период 2000–2021 гг. представлены в табл. 2. Для расчетов использован пакет прикладных программ Excel.



Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб воды
Fig. 1. Layout of water sampling stations

Таблица 1. Математические модели для расчетов региональных предельно допустимых концентраций
Table 1. Mathematical models for calculating regional maximum allowable concentrations

Авторы метода Authors	Модель Model
С. А. Патин S. A. Patin	$PDK_{PEG} = C_{CP} + 2\sigma$, C_{CP} – средняя концентрация, мкг/дм ³ , σ – стандартное отклонение $RMAC = S_{SR} + 2\sigma$, S_{SR} – average concentration, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, σ – standard deviation
Д. Г. Замолодчиков D. G. Zamolodchikov	$PDK_{PEG} = BK + 1,5(BK - NK)$, ВК и НК – верхний и нижний квартили распределения $RMAC = VK + 1.5(VK - NK)$, VC and NC – the upper and lower quartiles of the distribution
Е. В. Веницианов и соавторы E. V. Venitsianov and co-authors	$PDK_{PEG} = BK - 2,9\sigma/\sqrt{N}$, N – объем выборки $RMAC = VK - 2.9\sigma/\sqrt{N}$, N – sample size

Таблица 2. Показатели для расчетов региональных предельно допустимых концентраций металлов в Псковском озере, мкг/дм³

Table 2. Indicators for calculating regional maximum allowable concentrations of metals in Lake Pskov, µg/dm³

Металл Metal	N	C _{CP} S _{SR}	НК NC	БК VC	σ
Свинец Lead (Pb)	647	3,09	1,0	4,1	3,1
Медь Copper (Cu)	647	4,21	1,5	5,4	4,3
Кадмий Cadmium (Cd)	631	0,45	0,3	0,5	0,51
Марганец Manganese (Mn)	242	22,1	2,3	26,9	36,9
Железо общее Iron total (Fe)	609	187,6	60	220	204,4
Цинк Zinc (Zn)	56	22,5	10	31,0	16,4

Результаты и обсуждение

По формулам, приведенным в табл. 1, тремя методами были рассчитаны величины ПДК_{РЕГ} металлов в Псковском озере (табл. 3). В табл. 3 для последующего анализа добавлены значения ПДК металлов для рыбохозяйственных водных объектов (ПДК_{РХ}) [Приказ..., 2016] и среднее содержание металлов в земной коре (кларки) [Овчинников, 1990].

Приведенные в табл. 3 результаты расчетов ПДК_{РЕГ} показывают существенные различия этих величин в зависимости от метода расчета. К примеру, ПДК_{РЕГ} марганца в Псковском озере равна 95,9 мкг/дм³ при расчете методом С. А. Патина и 20,0 мкг/дм³ при расчете методом Е. В. Веницианова с соавторами, то есть различие составляет 4,8 раза. Как следует из табл. 3, наименьшие величины ПДК_{РЕГ} зафиксированы для каждого из шести рассмотренных металлов при использовании метода Е. В. Веницианова с соавторами.

Здесь уместно напомнить о принципе санитарного максимализма, когда все неопределенности и неоднозначности трактуются в сторону снижения показателя [Возняк, Лепихин, 2018]. Иными словами, в качестве оптимального метода расчетов ПДК_{РЕГ} следует рассматривать метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами.

По данным табл. 3 рассчитаны отношения ПДК_{РЕГ}/ПДК_{РХ} (рис. 2).

Приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что ПДК_{РЕГ} железа общего, меди, марганца и цинка больше ПДК_{РХ}, а ПДК_{РЕГ} свинца и кадмия – меньше ПДК_{РХ}. Не зафиксировано превышения ПДК_{РХ} для кадмия (пределы концентраций 0,03–4,5 мкг/дм³). В 44 пробах концентрации свинца были выше ПДК_{РХ} (пределы концентраций 1,0–21,1 мкг/дм³), что составляет 6,8 %.

Соотношение между натуральными логарифмами ПДК_{РЕГ} и натуральными логарифмами кларков металлов в земной коре представлено на рис. 3.

Таблица 3. Региональные предельно допустимые концентрации металлов в Псковском озере, мкг/дм³

Table 3. Regional maximum allowable concentrations of metals in Lake Pskov, µg/dm³

Авторы метода Authors	Fe	Cu	Pb	Mn	Cd	Zn
С. А. Патин S. A. Patin	596	12,9	9,3	95,9	1,5	55,3
Д. Г. Замолодчиков D. G. Zamolodchikov	460	11,3	8,8	63,8	0,95	62,5
Е. В. Веницианов и соавторы E. V. Venitsianov and co-authors	195	4,9	3,7	20,0	0,44	24,6
ПДК _{РХ} , мкг/дм ³ MPC _{BC} , µg/dm ³	100	1	6	10	5	10
Кларк, мг/кг Clark, mg/kg	53,3	0,053	0,013	0,9	0,00017	0,068

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

$$\ln \text{ПДК}_{\text{РЕГ}} = 3,419 + 0,471 \ln \text{Кларк}, \quad (1)$$

$$n = 6 \quad r = 0,965 \quad r^2 = 0,931 \quad \sigma_{Y(x)} = 0,606 \quad F_p = 54,1 \quad F_T = 6,61,$$

где n – количество металлов, r – коэффициент корреляции, r^2 – коэффициент детерминации,

$\sigma_{Y(x)}$ – стандартная ошибка, F_p – расчетное значение критерия Фишера, F_T – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 95 %.

Согласно шкале Чеддока соотношение между величинами $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ и кларками характеризуется «весьма высокой» теснотой связи между переменными [Макарова, Трофимец, 2002]. Зависимость (1) адекватна ($F_p > F_T$) и полезна для предсказания величин $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ для других тяжелых металлов ($F_p/F_T > 4$) [Дрейпер, Смит, 1986].

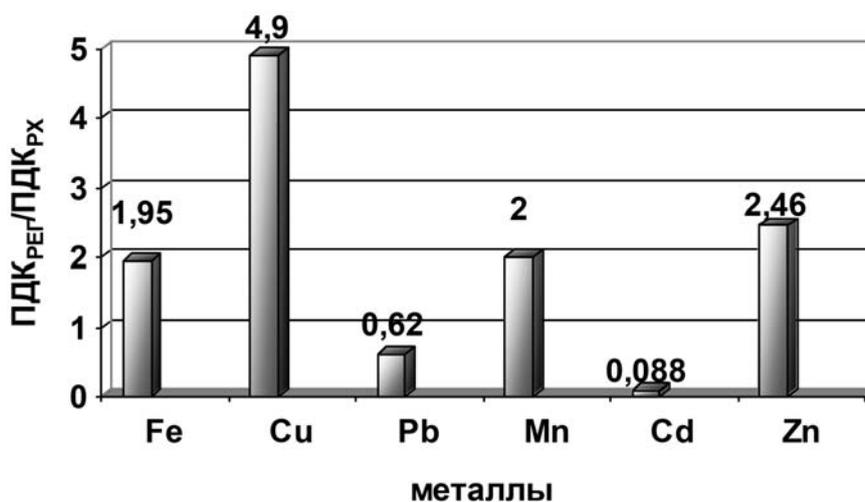


Рис. 2. Отношение региональных предельно допустимых концентраций металлов в Псковском озере к предельно допустимым концентрациям металлов для рыбохозяйственных водоемов

Fig. 2. Ratio of regional maximum allowable metal concentrations in Lake Pskov to maximum allowable metal concentrations for fishery reservoirs

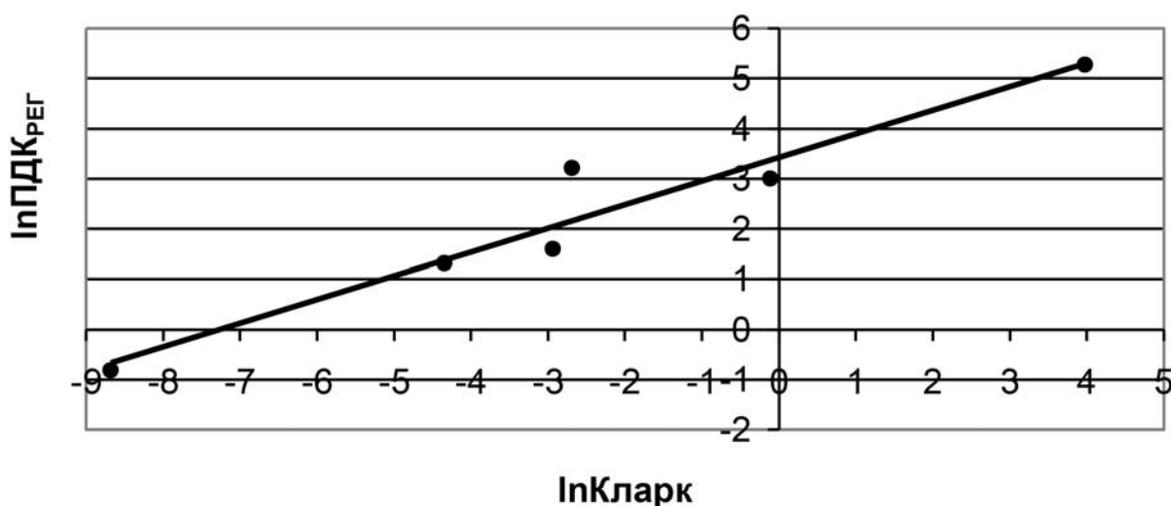


Рис. 3. Соотношение между натуральными логарифмами региональных предельно допустимых концентраций металлов в Псковском озере и кларками металлов в земной коре

Fig. 3. Correlation between natural logarithms of regional maximum allowable concentrations of metals in Lake Pskov and clarks of metals in the Earth's crust

Заключение

Наиболее существенный недостаток системы ПДК_{РХ} – отсутствие учета природно-климатических особенностей водосборов конкретных водных объектов. Эта система не учитывает специфику функционирования водных объектов в различных природно-климатических зонах (широтная и вертикальная зональность) и биогеохимических провинциях (естественные геохимические аномалии с различным уровнем содержания природных соединений), а значит, и их токсикорезистентность. Иными словами, система общефедеральных ПДК_{РХ} не учитывает региональные особенности водных объектов.

В исследованиях различных авторов предложены методы расчетов региональных ПДК_{РЕГ}. В данной статье для расчетов ПДК_{РЕГ} металлов в Псковском озере использованы три наиболее популярных метода: С. А. Патина, Д. Г. Замолдчиков и Е. В. Веницианова с соавторами. Следуя принципу санитарного максимализма, установлено, что в качестве оптимального метода расчетов ПДК_{РЕГ} следует рассматривать метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами.

Литература

Веницианов Е. В., Мирошниченко С. А., Лепихин А. П., Губернаторова Т. Н. Разработка и обоснование региональных показателей качества воды по содержанию тяжелых металлов для водных объектов бассейна Верхней Камы // Водное хозяйство России. 2015. № 3. С. 50–64.

Возняк А. А., Лепихин А. П. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // Географический вестник. 2018. № 2(45). С. 103–114. doi: 10.17072/2079-7877-2018-2-88-103

Волков И. В., Заличева И. Н., Шустова Н. К., Ильмаст Т. Б. Есть ли экологический смысл у общефедеральных рыбохозяйственных ПДК? // Экология. 1996. № 5. С. 350–354.

Гагарина О. В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы. Учеб.-метод. пособие. Ижевск: Удмуртский университет, 2012. 199 с.

Дмитриев В. В. Экологическое нормирование состояния и антропогенных воздействий на природные экосистемы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. 1994. Вып. 2. С. 60–70.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

Замолдчиков Д. Г. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. Т. 15. С. 214–233.

Левич А. П., Терехин А. Т. Метод расчета экологически допустимых уровней воздействия на пресноводные экосистемы // Водные ресурсы. 1997. № 3. С. 328–335.

Лозовик П. А. Критерии оценки антропогенного влияния на водные экосистемы // Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия: Тезисы докл. всерос. совещ. и выездной науч. сессии (Апатиты, 22–25 июня 1998 г.). Апатиты: КНЦ РАН, 1998. С. 36–37.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

Моисеенко Т. И. Оценка качества вод и «здоровье» экосистем с позиций экологической парадигмы // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 104–124.

Никаноров А. М., Тарасов М. Н., Трунов Н. М., Клименко О. А., Матвеева Н. П. Проблемы нормирования качества поверхностных вод и натурное экологическое моделирование // Экологическое нормирование и моделирование антропогенного воздействия на водные экосистемы: Сб. науч. трудов. Вып. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. С. 5–9.

Овчинников Л. Н. Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 248 с.

Патин С. А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана. М.: Пищ. пром-ть, 1979. 304 с.

Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 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». (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203). М.: Минсельхоз, 2016. 91 с.

Псковско-Чудское озеро / Науч. ред. Т. Тимм, А. Раукас, Ю. Хаберман, А. Яани. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 495 с.

Рисник Д. В., Беляев С. Д., Булгаков Н. Г., Левич А. П., Максимов В. Н., Мамихин С. В., Милько Е. С. Подходы к нормированию качества окружающей среды. Методы, альтернативные существующей системе нормирования в Российской Федерации // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133. С. 3–18.

Строков А. А. Особенности нормирования качества воды при разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 3. С. 105–109.

Фрумин Г. Т. Оценка состояния водных объектов и экологическое нормирование. СПб.: Синтез, 1998. 96 с.

Фрумин Г. Т. Экологически допустимые концентрации металлов в реках Санкт-Петербурга // Экологическая химия. 2015. № 24(2). С. 105–110.

References

Dmitriev V. V. Ecological regulation of the state and anthropogenic impacts on natural ecosystems. *Bulletin of St. Petersburg University*. 1994;7(2):60–70. (In Russ.)

Draper N., Smith G. Applied regression analysis. Moscow: Finance and statistics; 1986. 366 p. (In Russ.)

Frumin G. T. Assessment of the state of water bodies and environmental regulation. St. Petersburg: Sintez; 1998. 96 p. (In Russ.)

Frumin G. T. Environmentally acceptable concentrations of metals in the rivers of St. Petersburg. *Ecological Chemistry*. 2015;24(2):105–110. (In Russ.)

Gagarina O. V. Assessment and regulation of the quality of natural waters: criteria, methods, existing problems: Study guide. Izhevsk: Udmurtskii universitet; 2012. 199 p. (In Russ.)

Levich A. P., Terekhin A. T. A method for calculating environmentally acceptable levels of impact on freshwater ecosystems. *Water Resources*. 1997;(3):328–335. (In Russ.)

Lozovik P. A. Criteria for assessing the anthropogenic impact on aquatic ecosystems. *Anthropogenic impact on the nature of the North and its environmental consequences: Abstracts of the All-Russian meeting and visiting scientific session (Apatity, June 22-25, 1998)*. Apatity; 1998. P. 36–37. (In Russ.)

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistics in Excel. Moscow: Finance and statistics; 2002. 368 p. (In Russ.)

Moiseenko T. I. Assessment of water quality and the “health” of ecosystems from the standpoint of the ecological paradigm. *Water Management of Russia*. 2017;3:104–124. (In Russ.)

Nikanorov A. M., Tarasov M. N., Trunov N. M., Klimenko O. A., Matveeva N. P. Problems of standardization of surface water quality and natural environmental modeling. *Ecological regulation and modeling of anthropogenic impact on aquatic ecosystems: Collection of scientific papers*. Iss. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988; 5–9. (In Russ.)

Order of the Ministry of Agriculture of Russia N 552 dated December 13, 2016 ‘On approval of water quality standards water bodies of fishery significance, including the standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance’ (Registered in the Ministry of Jus-

tice of Russia on January 13, 2017 N 45203). Moscow: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 2016. 91 p.

Ovchinnikov L. N. Applied geochemistry. Moscow: Nedra; 1990. 248 p. (In Russ.)

Patin S. A. Impact of pollution on biological resources and productivity of the World Ocean. Moscow: Food industry; 1979. 304 p. (In Russ.)

Risnik D. V., Belyaev S. D., Bulgakov N. G., Levich A. P., Maksimov V. N., Mamikhin S. V., Mil’ko E. S. Approaches to standardization of environmental quality. Methods alternative to the existing system of regulation in the Russian Federation. *Successes of Modern Biology*. 2013;133:3–18. (In Russ.)

Strokov A. A. Features of water quality regulation in the development of standards for permissible impact on water bodies. *Bulletin of RUDN University. Ser. Ecology and Life Safety*. 2014;3:105–109. (In Russ.)

Timm T., Raukas A., Haberman J., Jaani A. (eds.). Lake Pskov-Peipsi. Tartu: Eesti Loodusfoto; 2012. 495 p. (In Russ.)

Venitsianov E. V., Miroshnichenko S. A., Lepikhin A. P., Gubernatorova T. N. Development and substantiation of regional indicators of water quality in terms of the content of heavy metals for water bodies of the Upper Kama basin. *Water Management of Russia*. 2015;3:50–64. (In Russ.)

Volkov I. V., Zalicheva I. N., Shustova N. K., Ilmast T. B. Does the federal fishery MPC make any ecological sense? *Ecology*. 1996;5:350–354. (In Russ.)

Voznyak A. A., Lepikhin A. P. Development of regional MACs: necessity, methodology, example *Geographic Bulletin*. 2018;2(45):103–114. (In Russ.)

Zamolodchikov D. G. Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 1993. Vol. 15. P. 214–233. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 20.03.2023; принята к публикации / accepted: 16.06.2023.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

д-р хим. наук, профессор кафедры физической географии и природопользования

e-mail: gfrumin@mail.ru

Негодина Евгения Сергеевна

аспирант

e-mail: 10020092@rambler.ru

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Dr. Sci. (Chem.), Professor

Negodina, Evgenia

Doctoral Student

УДК 574.589, 58.084.5

ОЦЕНКА СХОДСТВА ВИДОВОГО СОСТАВА МАКРОФИТОВ СОВРЕМЕННОЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И СУБРЕЦЕНТНЫХ СПОРОВО-ПЫЛЬЦЕВЫХ СПЕКТРОВ МАЛЫХ ОЗЕР НА ОСТРОВЕ ВАЛААМ (ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО)

Т. Ю. Газизова*, А. Г. Русанов, Т. В. Сапелко

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

Приведены результаты изучения субрецентных спорово-пыльцевых спектров (СПС) и современной водной растительности четырех малых озер на о. Валаам в Ладожском озере – Германовского, Зимняковского, Антониевского и Витальевского. Установлено, что изученные островные озера представляют собой сильно гумифицированные слабозаросшие водоемы с характерной водной растительностью. Преобладающим видом погруженных гидрофитов озер Германовского, Антониевского и Витальевского является мох *Fontinalis antipyretica* Hedw. Среди плавающих гидрофитов и гелофитов в озерах Германовском и Зимняковском доминирует *Nuphar lutea* (L.) Smith; в оз. Антониевском – *Nuphar lutea* (L.) Smith, *Nymphaea candida* J. Presl. и *Potamogeton* spp.; в оз. Витальевском – *Lemna minor* L. и *Hydrocharis morsus-ranae* L. Рассмотрено сходство видового состава макрофитов субрецентных СПС и современной водной растительности озер. Высокий уровень сходства отмечен только в двух водоемах – оз. Антониевском, для которого значения качественных индексов Жаккара и Серенсена – Чекановского составляют 0,60 и 0,75 соответственно, и оз. Зимняковском с высоким значением количественного индекса Брея – Кертиса (0,76). Однако почти все доминирующие по площади зарастания на момент изучения современной растительности виды макрофитов представлены и в субрецентных СПС, что позволяет говорить о довольно адекватном отражении водных растений в поверхностных пробах озерных отложений. Полученные результаты показывают перспективность изучения пыльцы макрофитов в поверхностных пробах и колонках донных отложений озер для характеристики современных озерных экосистем, а также в палеолимнологических исследованиях для реконструкции их динамики в прошлом.

Ключевые слова: макрофиты; субрецентные спорово-пыльцевые спектры; донные отложения; Ладожское озеро; островные озера

Для цитирования: Газизова Т. Ю., Русанов А. Г., Сапелко Т. В. Оценка сходства видового состава макрофитов современной водной растительности и субрецентных спорово-пыльцевых спектров малых озер на острове Валаам (Ладожское озеро) // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 73–83. doi: 10.17076/lim1703

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № FMNG-0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

T. Yu. Gazizova*, A. G. Rusanov, T. V. Sapelko. THE SIMILARITY ASSESSMENT OF THE MACROPHYTE SPECIES COMPOSITION BETWEEN MODERN AQUATIC VEGETATION AND SUBRECENT POLLEN SPECTRA OF SMALL LAKES ON THE VALAAM ISLAND (LAKE LADOGA)

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevast'yanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *tssml@bk.ru*

The article presents the results of studying the subrecent pollen spectra (SPS) and modern aquatic vegetation of four small lakes on Valaam Island (Lake Ladoga) – Germanovskoye, Zimnyakovskoye, Antonievskoye, and Vitalievskoye. We have established that the lakes are humus-rich reservoirs slightly overgrown with typical aquatic vegetation. The moss *Fontinalis antipyretica* Hedw. is the dominant species among submerged hydrophytes for lakes Germanovskoye, Antonievskoye, and Vitalievskoye. The dominant floating hydrophytes and helophytes are *Nuphar lutea* (L.) Smith for lakes Germanovskoye and Zimnyakovskoye; *Nuphar lutea* (L.) Smith, *Nymphaea candida* J. Presl., *Potamogeton* spp. for Lake Antonievskoe; *Lemna minor* L. and *Hydrocharis morsus-ranae* L. for Lake Vitalievskoye. The similarity of the macrophyte species composition between subrecent SPS and modern aquatic vegetation was analyzed. A high level of similarity was noted only for two lakes – Lake Antonievskoye with the qualitative Jaccard and Sorensen-Czekanowski indices at 0.60 and 0.75, respectively, and Lake Zimnyakovskoye with a high value of the quantitative Bray-Curtis index (0.76). However, almost all macrophyte species that dominated the overgrowth area during our study were present also in subrecent SPS, which suggests that top-core bottom samples quite adequately reflect modern aquatic vegetation. The results prove that studies of macrophyte pollen in the lake sediments hold promise for the study of modern lake ecosystems and for paleoreconstructions.

Keywords: macrophytes; subrecent pollen spectra; bottom sediments; Lake Ladoga; insular lakes

For citation: Gazizova T. Yu., Rusanov A. G., Sapelko T. V. The similarity assessment of the macrophyte species composition between modern aquatic vegetation and subrecent pollen spectra of small lakes on the Valaam Island (Lake Ladoga). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 73–83. doi: 10.17076/lim1703

Funding. The study was carried out under state assignment to the Institute of Limnology RAS – St. Petersburg Research Centre RAS within the theme # FMNG-0154-2019-0001 “Integrated assessment of changes in the ecosystems of Lake Ladoga and reservoirs in its catchment under natural and human impacts”.

Введение

Неотъемлемой частью исследования современных озерных экосистем является изучение макрофитов – непосредственных обитателей водной среды, отражающих состояние и динамику водоемов. Накапливающаяся в донных отложениях пыльца водных растений имеет плохую сохранность и довольно редкую встречаемость, однако она служит ценным источником информации о процессах, происходивших в озерах за время их существования [Газизова, Сапелко, 2020]. Поверхностные пробы донных отложений озер содержат усредненную за последние несколько лет информацию о растительности в пределах водосбора. Важность изучения субрецентных спорово-пыльцевых спектров (далее – СПС), полученных путем палинологического анализа поверхностных проб,

для понимания особенностей распространения палеорастительности неоднократно доказана в работах палинологов [Гричук, Заклинская, 1948; Кабайлене, 1969; Чернова и др., 2006; Новенко и др., 2011, 2017; Носова и др., 2015]. Палинологический анализ основан на методе актуализма, поэтому для реконструкции растительности прошлых эпох необходимо изучение субрецентных СПС, являющихся отражением современной растительности в озерных отложениях, с которыми сравниваются результаты палеореконструкций [Гричук, Заклинская, 1948].

Макроостатки макрофитов в отложениях озер используют в роли индикаторов потепления и похолодания климата, колебаний температуры и уровня водоемов, содержания химических элементов и загрязняющих веществ [Gałka et al., 2012, 2014; Gałka, Sznaj, 2013]. С помощью изучения современного распро-

странения макрофитов также возможно определять динамику антропогенной нагрузки на водоем [Андроникова, Распопов, 2007]. Основную роль в палеореконструкциях играет пыльца наземных травянистых и древесных растений, пыльца макрофитов реже используется для подобных исследований в связи с небольшой методической базой. Тем не менее предыдущие исследования динамики растительности в прошлом по колонкам донных отложений озер на о. Валаам подтверждают значимость пыльцы макрофитов для палеолимнологических реконструкций [Vuorela et al., 2001]. Целью нашей работы является изучение водной растительности островных озер для усовершенствования методической основы использования ее пыльцы в палеореконструкциях.

В настоящей работе приводится характеристика зарастания малых озер на о. Валаам и рассматривается степень присутствия пыльцы водных растений в палиноспектрах поверхностных проб донных отложений путем оценки сходства видового состава макрофитов актуальной растительности и субрецентных СПС. Полученные с помощью геоботанических и палинологических исследований данные позволят выявить закономерности отражения современных водных растений в субрецентных СПС и оценить возможности использования пыльцы макрофитов для палеореконструкций развития озерных экосистем.

Район исследования, материалы и методы

Полевые работы проводились в июне 2021 г. в рамках палеолимнологических исследований Института озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН на Ладожском озере на четырех озерах о. Валаам – Германовском, Зимняковском, Антониевском, Витальевском (рис. 1). Озера находятся на острове на различных абсолютных высотных отметках и образовались в позднем голоцене в результате изоляции от Ладожского озера [Сапелко и др., 2018]; в настоящее время это мелководные мезотрофные водоемы.

Валаам располагается в северной части акватории Ладожского озера, площадь острова составляет 28 км². Климат изучаемого региона находится под воздействием Ладожского озера, для него характерны значительные колебания температуры и высокая относительная влажность. Среднегодовая температура воздуха составляет +3,6 °С; средняя температура января –6,5...–10 °С, средняя температура июля +16...+18,5 °С; среднегодовое количество осадков 600–850 мм [Степанова и др., 2021].

Во время полевых исследований проводилось описание окружающей озера наземной растительности; видовой состав и структура зарослей макрофитов фиксировались общепринятым методом глазомерного картирования в ходе объезда береговой линии на лодке [Катанская, 1988]. Схемы пространственного



Рис. 1. Расположение озер на о. Валаам (Источник: Yandex)

Fig. 1. Location of lakes on the Valaam Island (Source: Yandex)

распределения макрофитов, полученные во время картирования современной водной растительности, послужили основой для подсчета площадей зарослей макрофитов в среде ГИС ArcView 3.2 [Карякин и др., 2009]. Для оценки степени зарастания озер использовалась классификация В. Г. Папченкова [2001].

Отбор поверхностных проб осуществлялся с катамарана с использованием лота Воронкова. Образцы для палинологического анализа подготавливались по модифицированной в Институте озероведения РАН сепарационной методике В. П. Гричука [Пыльцевой..., 1950] с использованием тяжелой жидкости удельным весом 2,28 г/см³. Идентификация палиноморф проводилась по определителям [Куприянова, Алешина, 1967, 1972, 1978] и с использованием электронных палинологических баз данных (<https://www.paldata.org/>, <https://www.paleoaltai.com/sibpal>). Для каждой пробы было подсчитано статистически значимое количество пыльцы – 300–600 зерен древесных растений. Обработка данных и построение спорово-пыльцевой диаграммы осуществлялись с помощью Tilia, Tilia-Graph, TGView [Grimm, 1999, 2004] и Microsoft Excel.

Для оценки сходства видового состава макрофитов применялись качественные и количественные коэффициенты сходства, рассчитанные в программе Past [Hammer et al., 2001]. Для качественной оценки сходства использовались коэффициент флористической общности Жаккара и коэффициент Серенсена – Чекановского, определяемые соответственно формулами:

$$I_J = \frac{a}{a+b+c} \text{ и } I_{Cs} = \frac{2a}{(a+b)+(a+c)}$$

В данном случае a – число общих видов для двух списков, b – число видов, имеющих только в первом списке (современные макрофиты), c – только во втором списке (субрецентные СПС) [Песенко, 1982]. Формула Жаккара более строгая, а формула Серенсена – Чекановского более чувствительна при невысоком сходстве выборок – значения коэффициента при этом несколько выше [Методы..., 1975]. Для количественной оценки сходства был рассчитан коэффициент сходства Брея – Кертиса, отражающий как наличие общих таксонов в выборках, так и количественные соотношения между ними и определяемый формулой:

$$d_{jk} = 1 - \frac{\sum_i |x_{ji} - x_{ki}|}{\sum_i (x_{ji} + x_{ki})}$$

Значения x_{ji} и x_{ki} отражают обилие i -го вида в списках j (субрецентные СПС) и k (современные макрофиты) [Песенко, 1982].

Результаты исследования

Результаты изучения современной водной растительности озер

Озеро Германовское имеет площадь 0,01 км², глубина достигает 3,7 м [Степанова и др., 2021], донные отложения представлены гиттиями. По степени зарастания озеро относится к слабозаросшим водоемам (площадь зарастания на момент изучения 7 %) (табл. 1).

Сплавина оз. Германовского небольшая, шириной в среднем 1–2 метра. Топкая часть шириной около 0,5 метра сложена осоками (*Carex rostrata*, *C. nigra* (L.) Reichard), *Phragmites australis*, *Naumburgia thyrsoiflora* (L.) Reichenb., *Menyanthes trifoliata* L., *Calla palustris* L., сфагновыми мхами; на более сухих участках и куртинах появляются политриховые мхи. Под пологом подступающего к озеру леса произрастают *Ledum palustre* L., *Eriophorum vaginatum* L., *Vaccinium myrtillus* L., *V. vitis-idaea* L., *Comarum palustre* L., *Oxycoccus palustris* Pers., *Drosera rotundifolia* L. Древесный ярус окружающей территории представлен *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H. Karst., *Betula* spp., *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Juniperus communis* L., *Betula nana* L.

Озеро Зимняковское имеет площадь 0,019 км², максимальная глубина достигает 2,1 м [Степанова и др., 2021], донные осадки сложены гиттиями и глинистыми песками. Озеро относится к слабозаросшим водоемам (6 %) (табл. 1).

Большую часть западного берега занимает сплавина, поросшая мхом (*Sphagnum* spp.) и влаголюбивым разнотравьем – *Naumburgia thyrsoiflora*, *Comarum palustre*, *Menyanthes trifoliata*, *Phragmites australis*, *Calla palustris*, *Equisetum fluviatile* L., *Juncus* spp. Узкой полосой вдоль уреза воды по сплавине протянулись заросли осок (*Carex rostrata*, *C. nigra*). На островках встречен *Galium aparine* L. На берегах также произрастают *Eriophorum vaginatum*, *Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *Oxycoccus palustris*, сфагновые и политриховые мхи; в древесном ярусе – *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula* spp., *Alnus glutinosa*, *Juniperus communis*.

Озеро Антониевское – это самый крупный водоем из исследованных, имеющий два вытянутых залива – северо-западный и юго-западный; его площадь составляет 0,028 км², глубина достигает 3,5 м [Степанова и др., 2021].

Таблица 1. Видовой состав и вклад макрофитов в общую площадь покрытия зеркала озер на о. Валаам

Table 1. Species composition and contribution of macrophytes to the total surface area of lakes on the Valaam Island

Виды Species	Германовское Lake Germanovskoye		Зимняковское Lake Zimnyakovskoye		Антониевское Lake Antonievskoye		Витальевское Lake Vitalievskoye	
	Площадь Area							
	м ² m ²	%	м ² m ²	%	м ² m ²	%	м ² m ²	%
Погруженные гидрофиты Submerged hydrophytes								
<i>Fontinalis antipyretica</i> Hedw.	400	56	10	1	230	19	60	16
<i>Utricularia minor</i> L.	–	–	>1	–	–	–	–	–
Плавающие гидрофиты Floating hydrophytes								
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> L.	–	–	–	–	–	–	30	9
<i>Lemna minor</i> L.	–	–	–	–	–	–	20	5
<i>Nuphar lutea</i> (L.) Smith	40	5	560	51	600	50	>1	–
<i>Nymphaea candida</i> J. Presl.	–	–	50	5	140	11	–	–
<i>Potamogeton natans</i> L.	–	–	90	8	–	–	–	–
Гелофиты Helophytes								
<i>Equisetum fluviatile</i> L.	–	–	>1	–	–	–	–	–
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	140	19	–	–	–	–	–	–
<i>Sparganium</i> sp.	–	–	–	–	120	10	–	–
<i>Typha angustifolia</i> L.	–	–	30	3	–	–	–	–
Гигрогелофиты Hydrogelophytes								
<i>Calla palustris</i> L.	30	4	–	–	50	4	80	22
<i>Carex rostrata</i> Stokes	80	11	170	16	–	–	180	48
<i>Comarum palustre</i> L.	>1	–	10	1	10	1	>1	–
<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	20	3	40	4	20	2	–	–
<i>Naumburgia thyrsoiflora</i> (L.) Reichenb.	10	1	50	4	40	3	>1	–
Гигрофиты Hygrophytes								
<i>Carex nigra</i> (L.) Reichard	10	1	80	7	–	–	–	–
Общая площадь Total area	720	100	1090	100	1200	100	370	100

Озеро относится к очень слабо заросшим водоемам (4 %).

Водная растительность занимает в основном узкую прибрежную полосу, протянувшуюся вдоль плесов между заливами. Центральная часть озера полностью лишена растительности. Плавающие растения (*Nuphar lutea*, *Nymphaea candida* J. Presl.) доминируют, занимая 61 % от общей площади зарастания. Небольшие фрагменты придонных зарослей *Fontinalis antipyretica* равномерно распределены в прибрежной полосе по всему озеру, образуя погруженный ярус растительности, занимающий 19 %. Гелофиты и гигрогелофиты играют сопутствующую роль, занимая 20 %. Гелофиты представлены также равномерно распределенным по всей прибрежной полосе *Sparganium* sp., куртины которого вместе с *Nuphar lutea* и *Nymphaea candida* формируют основу растительного пояса на плесах

озера. В заливах по урезу воды расположены мозаичные заросли гигрогелофитов, образованные *Calla palustris*, *Menyanthes trifoliata* и *Naumburgia thyrsoiflora*.

Сплавины как таковой нет, лес подступает к береговой линии, где растут *Ledum palustre*, *Comarum palustre*, *Menyanthes trifoliata*, *Eriophorum vaginatum*, *Calla palustris*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Oxycoccus palustris*, *Drosera rotundifolia*, *Ephedra* spp., сфагновые и политриховые мхи. Озеро окружено лесом из *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula* spp., *Alnus glutinosa*, *A. incana* (L.) Moench, *Juniperus communis*.

Озеро Витальевское является самым маленьким из изучаемых водоемов – площадь 0,005 км², максимальная глубина 1,9 м [Степанова и др., 2021]. Донные осадки представлены гиттиями и песками. Озеро относится к слабо заросшим водоемам (9 %).

Озеро активно зарастает и заболачивается. Юго-западный берег образован сплавиной, поросшей мхом (*Sphagnum* spp.) и влаголюбивым разнотравьем; вдоль берега протянулась узкая полоса зарослей *Carex rostrata*. На северо-восточном берегу преобладает лесная растительность, плавающих вдоль берега водных растений практически нет. Растения уреза воды доминируют в зарастании озера (70 % в общей площади зарослей). Куртины *Calla palustris* сосредоточены в основном в южной заболоченной оконечности водоема; здесь же располагаются свободно плавающие на поверхности воды растения – *Hydrocharis morsus-ranae* L. и *Lemna minor* L. Плавающая и погруженная растительность играет второстепенную роль в зарастании озера (14 и 16 %). Погруженная растительность представлена мхом *Fontinalis antipyretica*, фрагменты погруженных зарослей которого встречаются в основном вдоль юго-западного берега.

На топких участках сплавины произрастают куртины *Carex rostrata*, *Calla palustris*, *Comarum palustre*, *Naumburgia thyrsoiflora*, *Охосoccus palustris*, *Eriophorum vaginatum*, сфагновые мхи. Под лесным пологом доминируют *Rubus chamaemorus* L., *Vaccinium myrtillus*, сфагновые мхи на влажных и политриховые мхи (в частности, *Polytrichum commune* Hedw.) на более сухих участках (куртинах). Древесный ярус окружающей озера территории представлен *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula* spp., *Alnus glutinosa*, *A. incana*, *Juniperus communis*.

Результаты изучения поверхностных проб донных отложений озер

По результатам палинологического анализа поверхностных проб донных отложений изучаемых озер построена сводная спорово-пыльцевая диаграмма (рис. 2). Отмечено существенное преобладание пыльцы древесных пород, особенно *Pinus* spp. Доминирующие позиции занимает также пыльца *Picea* spp. и *Betula* spp., чьи максимальные значения составляют соответственно 22 % (оз. Зимняковское) и 30 % (оз. Германовское). Содержание пыльцы *Alnus glutinosa* составляет 9 % (оз. Германовское), пыльцы *Alnus incana* – 2 % (оз. Антониевское). Концентрация пыльцы *Betula nana*, обитающей на сплавинах и заболоченных участках, достигает 6 % (оз. Антониевское). Присутствует пыльца широколиственных пород (*Carpinus* spp., *Corylus avellana*, *Fraxinus* spp., *Quercus* spp., *Ulmus* spp., *Tilia* spp.) и кустарников (*Salix* spp., *Lonicera* spp., *Juniperus* spp., *Ephedra* spp.). Среди трав доминирует пыльца семейств *Poaceae*, *Cyperaceae* (до 5 % для оз. Антониевского и 3 % для оз. Витальевского соответственно) и разнотравья. Представители *Bryales*, *Polypodiaceae* и *Sphagnum* spp. преобладают среди споровых растений.

Среди водных растений отмечены для оз. Германовское – *Nuphar lutea*, *Nymphaea candida*, *Potamogeton* spp.; оз. Зимняковское – *N. lutea*; оз. Антониевское – *Myriophyllum* spp., *N. lutea*, *N. candida*, *Potamogeton* spp., *Spar-*

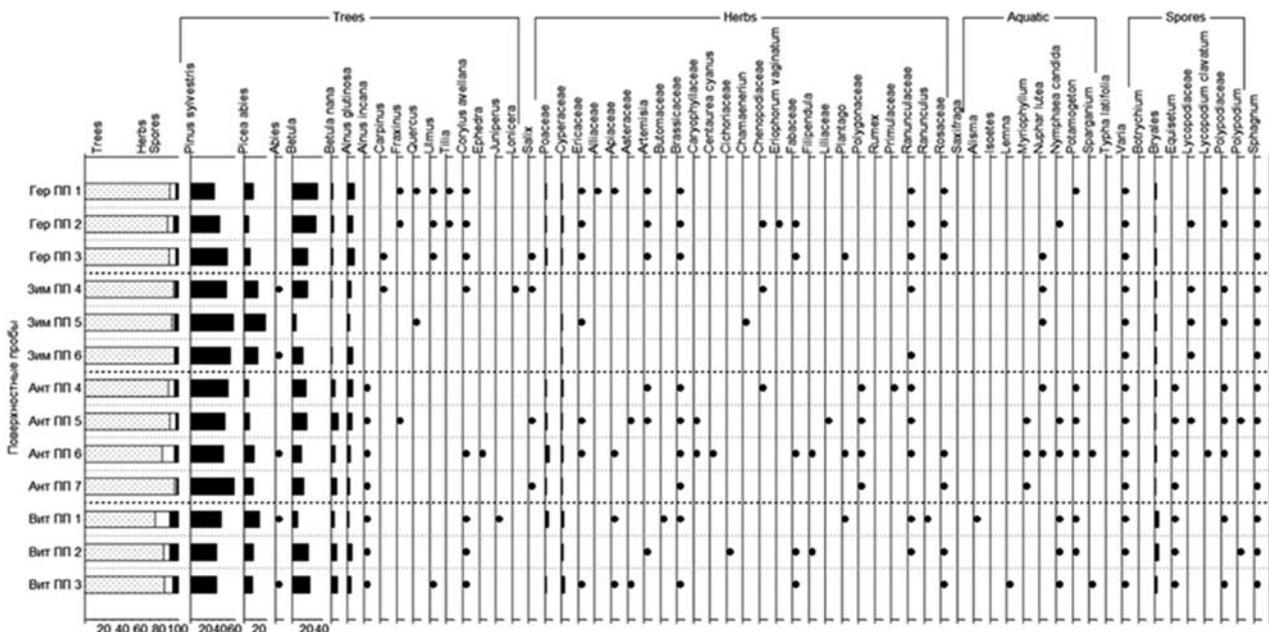


Рис. 2. Спорово-пыльцевая диаграмма поверхностных проб озерных отложений

Fig. 2. Spore-pollen diagram of surface samples of lake sediments

ganium spp.; оз. Витальевское – *Alisma* spp., *Lemna* spp., *N. candida*, *Potamogeton* spp., *Sparganium* spp.

Результаты оценки сходства видового состава макрофитов современной водной растительности озер и субрецентных СПС

При оценке сходства видового состава макрофитов (табл. 2) выборки включали в себя виды плавающих гидрофитов и гелофитов, встреченных при изучении современной растительности и в субрецентных СПС озер на о. Валаам. Споры мха *Fontinalis antipyretica* – погруженного гидрофита, занимающего значительные площади в Германовском и присутствующего в Антониевском и Витальевском озерах, не были идентифицированы при анализе и не учитывались при оценке.

При качественной оценке без учета обилия видов наблюдается довольно высокий уровень сходства видового состава макрофитов оз. Антониевского (значения индексов Жаккара и Серенсена – Чекановского 0,60 и 0,75 соответственно). Что касается количественного индекса Брея – Кертиса, низкие значения коэффициента указывают на невысокий уровень сходства видовой структуры (соотношения обилия таксонов). Из озер на о. Валаам высокое значение индекса отмечено для оз. Зимняковского (0,76), в котором по площади зарастания существенно преобладает *Nuphar lutea* – единственный встреченный в палиноспектрах озера макрофит.

Обсуждение результатов

Полученные данные анализа субрецентных СПС озер на о. Валаам (рис. 2) отражают как региональные условия (доминирование на территории острова сосновых лесов с елью и

березой), так и сугубо локальные условия (таксономический состав макрофитов, водно-болотных видов и др.). Разнообразие травянистых растений, радиус разноса пыльцы которых ограничен пределами ареала, показывает состав береговой растительности и травяного яруса в окружающих озера лесах. Дальность распространения пыльцы широколиственных пород и кустарников также в большинстве своем ограничена ареалом [Сладков, 1967], что свидетельствует о достоверном присутствии широколиственных пород в окружающих озера лесах.

Анализ зарастания изученных озер показывает, что характер их водной растительности в целом соответствует озерам с сильно гумифицированной водой. Все водоемы характеризуются повышенной цветностью воды вследствие заболоченности водосбора. Недостаток подводной освещенности, вызванный высоким содержанием гуминовых веществ, способствует доминированию надводных и плавающих растений над погруженными растениями [Toivonen, Huttunen, 1995; Nurminen, 2003]. Эта особенность хорошо прослеживается для растительного покрова трех озер – Зимняковского, Антониевского и Витальевского, в которых бедный видовой состав погруженной растительности (представленной исключительно мхом *Fontinalis antipyretica*) сопровождается ее второстепенной ролью в зарастании дна водоемов. Вероятно, более пологое дно оз. Германовского и, как следствие, лучшие условия подводной освещенности благоприятствуют обильному развитию *Fontinalis antipyretica*.

Несмотря на неоднозначные результаты оценки сходства (табл. 2), большинство доминирующих по площади зарастания на момент изучения растительности видов макрофитов (табл. 2) встречены при палинологическом анализе озерных отложений (табл. 3). Также

Таблица 2. Данные оценки сходства видового состава макрофитов современной растительности и субрецентных СПС озер на о. Валаам

Table 2. Data on the species composition similarity of macrophytes between modern vegetation and subrecent SPS of lakes on the Valaam Island

	Германовское Lake Germanovskoye	Зимняковское Lake Zimnyakovskoye	Антониевское Lake Antonievskoye	Витальевское Lake Vitalievskoye
Качественные индексы Quality indexes				
Индекс Жаккара Jacquard Index	0,33	0,25	0,60	0,14
Индекс Серенсена – Чекановского Sorensen – Chekanovsky Index	0,50	0,40	0,75	0,25
Количественные индексы Quantitative indexes				
Bray – Curtis Index	0,33	0,76	0,41	0,11

отмечена пыльца присутствующих и/или преобладающих в субрецентных СПС макрофитов, но не участвующих в зарастании озера на момент изучения (*Potamogeton* spp. и *Myriophyllum* spp. для оз. Антониевского; *Nymphaea candida*, *Potamogeton* spp., *Alisma* spp., *Sparganium* spp. для оз. Витальевского). Скорее всего, данные растения исчезли из водоемов сравнительно недавно в результате естественных сукцессионных процессов. Особенно это актуально для оз. Витальевского, которое ввиду небольшой площади зеркала и высокой интенсивности процессов зарастания и заболачивания является наиболее динамично развивающимся водоемом среди изученных. Широкое распространение в нем *Lemna minor* связано, возможно, с большой степенью органической нагрузки, высокой продуктивностью водоема, мелководностью и другими морфометрическими характеристиками озера [Асатрян и др., 2016].

Дальнейшие исследования особенностей отражения макрофитов в субрецентных СПС в других водоемах будут способствовать уточнению полученных результатов и в будущем могут быть использованы для изучения закономерностей сукцессионного развития малых озер. В настоящее время процессы зарастания исследуются в основном с помощью установления сукцессионных связей на основе ежегодного изучения пространственных (экологических и фитоценологических) рядов [Конограй, 2014]. Поверхностные пробы содержат усредненную информацию о растительности озер и их водосборов за последние 3–5 лет. Выявленные в ходе наших работ особенности отражения макрофитов в субрецентных СПС позволят получать данные о многолетней динамике растительности и изучать процессы зарастания водоемов без необходимости проведения ежегодного мониторинга. Это также упростит изучение динамики антропогенной нагрузки на водоемы с использованием макрофитов в качестве индикаторов загрязненности водоемов поллютантами, требующее регулярных исследований [Андроникова, Распопов, 2007].

Для интерпретации результатов и их использования в палеорекострукциях полученные палинологические данные обычно сравнивают с данными изучения растительных макроостатков для их уточнения и подтверждения. Исследований макроостатков макрофитов и их индикаторной роли проводится в настоящее время значительно больше [Gałka et al., 2012, 2014; Gałka, Sznell, 2013], чем исследований пыльцы макрофитов. Например, присутствие видов рода *Typha* в отложениях раннего голоцена может индексировать потепление климата, а на-

личие *Potamogeton natans*, *Nymphaea alba* L. и *Typha* spp., обычно произрастающих в мелководных озерах, – указывать на понижение уровня водоемов. Присутствие видов *Potamogeton*, *Nymphaea* и *Typha* в субрецентных СПС на о. Валаам также служит индикатором мелководности изучаемых озер.

Имеющиеся немногочисленные работы по изучению колонок донных отложений озер палинологическим методом с использованием динамики пыльцы макрофитов [Vuorela et al., 2001; Газизова, Сапелко, 2020 и др.] показывают значение пыльцы водных растений для палеорекострукций колебания уровня водоемов и динамики озерных экосистем в прошлом. Усиление антропогенной деятельности и последующая эвтрофикация водоемов также отражается в палиносpectрах – наблюдается разрастание *Myriophyllum spicatum*, *Nymphaea* spp., *Alisma* spp., *Potamogeton* spp. и других видов макрофитов [Vuorela et al., 2001]. Появление данных видов свидетельствует и о процессах естественной эвтрофикации. Таким образом, высокое обилие *Potamogeton* spp., *Nymphaea candida*, *Alisma* spp. в субрецентных СПП оз. Витальевского (табл. 3) подтверждает высокое содержание органических веществ в водоеме, установленное в ходе полевых исследований.

Выводы

При изучении современной водной растительности озер на о. Валаам установлено, что исследованные водоемы – сильно гумифицированные, с характерной водной растительностью. Преобладающим видом среди погруженных гидрофитов в озерах Германовском, Антониевском и Витальевском является мох *Fontinalis antipyretica*. Среди плавающих гидрофитов и гелофитов доминируют: для озер Германовского и Зимняковского – *Nuphar lutea*; для оз. Антониевского – *N. lutea*, *Nymphaea candida* и *Potamogeton* spp; для оз. Витальевского – *Lemna minor* и *Hydrocharis morsus-ranae*. По степени зарастания озера относятся к слабо и очень слабо заросшим водоемам (4–9 % от площади зеркала).

По результатам палинологического анализа поверхностных проб донных отложений изучаемых водоемов в оз. Германовском отмечена пыльца *N. lutea*, *N. candida*, *Potamogeton* spp.; в оз. Зимняковском – пыльца *N. lutea*; в оз. Антониевском – пыльца *Myriophyllum* spp., *N. lutea*, *N. candida*, *Potamogeton* spp., *Sparganium* spp.; в оз. Витальевском – пыльца *Alisma* spp., *Lemna* spp., *N. candida*, *Potamogeton* spp., *Sparganium* spp.

Таблица 3. Присутствие макрофитов в субрецентных СПС и поверхностных пробах озерных отложений
Table 3. The presence of macrophytes in subrecent SPS and surface samples of lake sediments

Озеро Lake	Макрофиты, пыльца которых встречена в субрецентных СПС Macrophytes whose pollen is found in subrecent SPS	% от всей пыльцы % of all pollen	Макрофиты, встреченные во время описания современной растительности Macrophytes found during the modern vegetation description	% от общей площади гидрофитов и гелофитов % of the total area of hydrophytes and helophytes
Германовское Lake Germanovskoye	<i>Nuphar lutea</i>	33,3	<i>Nuphar lutea</i> *	100
	<i>Nymphaea candida</i>	33,3	<i>Nymphaea candida</i>	–
	<i>Potamogeton</i> sp.	33,3	<i>Potamogeton</i> sp.	–
Зимняковское Lake Zimnyakovskoye	<i>Nuphar lutea</i>	100	<i>Nuphar lutea</i> *	76
	<i>Nymphaea candida</i>	–	<i>Nymphaea candida</i>	7,5
	<i>Potamogeton natans</i>	–	<i>Potamogeton natans</i>	12
	<i>Typha angustifolia</i>	–	<i>Typha angustifolia</i>	4,5
Антониевское Lake Antonievskoye	<i>Myriophyllum</i> sp.	18	<i>Myriophyllum</i> sp.	–
	<i>Nuphar lutea</i>	23	<i>Nuphar lutea</i> *	70,5
	<i>Nymphaea candida</i>	9	<i>Nymphaea candida</i>	15,5
	<i>Potamogeton</i> sp.	41	<i>Potamogeton</i> sp.	0
	<i>Sparganium</i> sp.	9	<i>Sparganium</i> sp.	14
Витальевское Lake Vitalievskoye	<i>Alisma</i> sp.	21	<i>Alisma</i> sp.	–
	<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>	–	<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> *	62
	<i>Lemna</i> sp.	10,5	<i>Lemna minor</i> *	34,5
	<i>Nuphar lutea</i>	0	<i>Nuphar lutea</i>	3,5
	<i>Nymphaea candida</i>	37	<i>Nymphaea candida</i>	–
	<i>Potamogeton</i> sp.	26,5	<i>Potamogeton</i> sp.	–
	<i>Sparganium</i> sp.	5	<i>Sparganium</i> sp.	–

Примечание. Символом * отмечены доминанты на момент изучения современной водной растительности.
Note. The symbol * indicates the dominant at the time of studying modern aquatic vegetation.

Данные указанного анализа демонстрируют различный уровень сходства с материалами изучения современной водной растительности озер. Для оз. Антониевского выявлен наибольший качественный уровень сходства (значения индексов Жаккара и Серенсена – Чекановского составляют 0,60 и 0,75 соответственно); для оз. Зимняковского наблюдается высокое значение количественного индекса Брея – Кертиса (0,76). Для озер Германовского и Витальевского отмечаются невысокие индексы сходства. Однако практически все виды макрофитов, доминирующие по площади зарастания на момент изучения современной водной растительности, представлены в субрецентных СПС, что позволяет говорить о довольно адекватном отражении современной водной растительности в поверхностных пробах озерных отложений.

Полученные результаты занимают значимое место среди работ аналогичной тематики. Они показывают перспективность изучения пыльцы макрофитов в поверхностных пробах и колонках донных отложений озер для характеристики современных озерных экосистем (в частности, видового состава водной растительности и доминантов по зарастанию), а также в палеоэкологических исследованиях для реконструкции их динамики в прошлом.

Литература

- Андроникова И. Н., Распопов И. М. Зоны экологического риска в прибрежных районах Ладожского озера // Биология внутренних вод. 2007. № 2. С. 2–10.
- Асатрян В. Л., Барсебян Н. Э., Варданян Т. В., Епремян Э. В., Айрапетян А. О., Даллакян М. Р., Габриелян Б. К. Анализ состояния биоценозов на мелководьях Малого Севана (Армения) в период повышения уровня воды // Биология внутренних вод. 2016. № 1. С. 3–10. doi: 10.7868/S0320965216010034
- Газизова Т. Ю., Сапелко Т. В. Обоснование значения пыльцы макрофитов для палеоэкологических реконструкций на примере озер острова Лункулансари (северо-восток Ладожского озера) // Биосфера. 2020. Т. 12, № 4. С. 231–241. doi: 10.24855/biosfera.v12i4.566
- Гричук В. П., Заклинская Е. Д. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: Географгиз, 1948. 224 с.
- Кабайлене М. В. Формирование пыльцевых спектров и методы восстановления палеорастительности. Вильнюс: Минтис, 1969. 148 с.
- Катанская В. М. Высшая водная растительность // Методические аспекты лимнологического мониторинга. Л.: Наука, 1988. С. 102–113.
- Карякин И. В., Лапшин Р. Д., Шестакова А. А. ArcView GIS для экологов. Инструктивно-методическое пособие. Н. Новгород, 2009. 543 с.

Конограй В. А. Особенности зарастания Кременчугского водохранилища // Биология внутренних вод. 2014. № 2. С. 54–60. doi: 10.7868/S0320965214020065

Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Палинологическая терминология покрытосеменных растений. Л.: Наука, 1967. 86 с.

Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1972. Т. 1. 171 с.

Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца двудольных растений флоры европейской части СССР. Lamiaceae – Zygophyllaceae. Л.: Наука, 1978. 184 с.

Методы почвенно-зоологических исследований: Сб. ст. / Отв. ред. М. С. Гиляров. М.: Наука, 1975. 279 с.

Новенко Е. Ю., Носова М. Б., Красноруцкая К. В. Особенности поверхностных спорово-пыльцевых спектров южной тайги восточно-европейской равнины // Известия Тульского гос. ун-та. 2011. № 2. С. 345–354.

Новенко Е. Ю., Мазей Н. Г., Зерницкая В. П. Рецентные спорово-пыльцевые спектры заповедных территорий европейской части России как ключ к интерпретации результатов палеоэкологических исследований // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2017. Т. 2, № 2. С. 55–65. doi: 10.24189/ncr.2017.012

Носова М. Б., Северова Е. Э., Волкова О. А. Многолетние исследования современных палинологических спектров в средней полосе европейской части России // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. биол. 2015. Т. 120, № 6. С. 42–50.

Папченков В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль, 2001. 213 с.

Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 287 с.

Пыльцевой анализ / Сост. А. Н. Гладкова, В. П. Гричук, Е. Д. Заклинская [и др.]; ред. И. М. Покровская; под общ. ред. А. Н. Криштофовича. М.: Гос. изд-во геол. лит-ры, 1950. 572 с.

Сапелко Т. В., Терехов А. В., Амантов А. В. Ладожская трансгрессия: реконструкция финальной стадии и последующего спада в северной части озера // Региональная геология и металлогения. 2018. № 75. С. 23–34.

Сладков А. Н. Введение в спорово-пыльцевой анализ. М.: Наука, 1967. 270 с.

Степанова А. Б., Воякина Е. Ю., Зуева Н. В. и др. Водная система Валаамского архипелага. Малые лесные озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев, Ш. Р. Поздняков, В. А. Румянцев. СПб., 2021. С. 477–485.

Чернова Г. М., Денисенков В. П., Ломова Е. И. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры северо-западного Приладожья на примере Ладожской учебно-географической базы // Вестник СПбГУ. 2006. Сер. 7, № 1. С. 70–79.

Galka M., Tobolski K., Kołaczek P. The Holocene decline of slender naiad (*Najas flexilis* (Willd.) Rostk. & Schmidt) in NE Poland in the light of new paleobotanical data // Acta Palaeobot. 2012. Vol. 52. P. 127–138.

Galka M., Tobolski K., Zawisza E. et al. Postglacial history of vegetation, human activity and lake-level changes at Jezioro Linówek in northeast Poland, based on multi-proxy data // Veget. Hist. Archaeobot. 2014. Vol. 23. P. 123–152. doi: 10.1007/s00334-013-0401-7

Galka M., Sznajder M. Late Glacial and Early Holocene development of lakes in northeastern Poland in view of plant macrofossil analyses // Quat. Int. 2013. Vol. 292. P. 124–135. doi: 10.1016/j.quaint.2012.11.014

Grimm E. C. Tilia and Tilia-Graph PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, working group on data-handling methods // Newsletter. 1999. Vol. 4. P. 5–7.

Grimm E. C. TGView 2.0.2 (Software). Springfield: Illinois State Museum, Research and Collections Center, 2004.

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontol. Electron. 2001. Vol. 4, no. 1. P. 9.

Nurminen L. Macrophyte species composition reflecting water quality changes in adjacent water bodies of Lake Hiidenvesi, SW Finland // Ann. Bot. Fenn. 2003. Vol. 40. P. 199–208.

Toivonen H., Huttunen P. Aquatic macrophytes and ecological gradients in 57 small lakes in southern Finland // Aquat. Bot. 1995. Vol. 51. P. 197–22.

Vuorela I., Lempiäinen T., Saarnisto M. Land use pollen record from the Island of Valamo, Russian Karelia // Ann. Bot. Fenn. 2001. Vol. 38. P. 139–165.

References

Andronikova I. N., Raspopov I. M. Risk zones in the coastal areas of Lake Ladoga. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2007;2:2–10. (In Russ.)

Asatryan V. L., Barseghyan N. E., Vardanyan T. V., Yepremyan H. V., Hayrapetyan A. O., Dallakyan M. R., Gabrielyan B. K. Analysis of the state of biocenoses that formed in shallow areas of Small Sevan (Armenia) during the period of lake's water level rise. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2016;9(1). doi: 10.1134/S199508291601003X (In Russ.)

Chernova G. M., Denisenkov V. P., Lomova E. I. Subrecent spore-pollen spectra of the northwestern Ladoga region on the example of the Ladoga educational and geographical base. *Vestnik of St. Petersburg University*. 2006;7(1):70–79. (In Russ.)

Galka M., Tobolski K., Kołaczek P. The Holocene decline of slender naiad (*Najas flexilis* (Willd.) Rostk. & Schmidt) in NE Poland in the light of new paleobotanical data. *Acta Palaeobot*. 2012;52:127–138.

Galka M., Tobolski K., Zawisza E. et al. Postglacial history of vegetation, human activity and lake-level changes at Jezioro Linówek in northeast Poland, based on multi-proxy data. *Veget. Hist. Archaeobot*. 2014;23:123–152. doi: 10.1007/s00334-013-0401-7

Galka M., Sznajder M. Late Glacial and Early Holocene development of lakes in northeastern Poland in view of plant macrofossil analyses. *Quat. Int*. 2013;292:124–135. doi: 10.1016/j.quaint.2012.11.014

Gazizova T. Yu., Sapelko T. V. Substantiation of the importance of macrophyte pollen for paleolimnological

reconstructions as exemplified with Lunkulansaari island lakes (the northeast of Lake Ladoga). *Biosfera = Biosphere*. 2020;12(4):231–241. doi: 10.24855/biosfera.v12i4.566 (In Russ.)

Gilyarov M. S. (ed.). Methods of soil and zoological research. Collected papers. Moscow: Nauka; 1975. 279 p.

Gladkova A. N., Grichuk V. P., Zaklinskaya E. D. et al. (comp.); Krishtofovich A. N., Pokrovskaya I. M. (eds.). Pollen analysis. Moscow: Gos. izd-vo geol. lit-ry; 1950. 572 p. (In Russ.)

Grichuk V. P., Zaklinskaya E. D. Analysis of fossil pollen and spores and its application in paleogeography. Moscow: Geografiz; 1948. 224 p. (In Russ.)

Grimm E. C. Tilia and Tilia-Graph PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, working group on data-handling methods. *Newsletter*. 1999;4:5–7.

Grimm E. C. TGView 2.0.2 (Software). Springfield: Illinois State Museum, Research and Collections Center; 2004.

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontol. Electron*. 2001;4(1):9.

Kabailene M. V. Formation of pollen spectra and methods of paleovegetation restoration. Vilnius: Mintis; 1969. 148 p. (In Russ.)

Karyakin I. V., Lapshin R. D., Shestakova A. A. ArcView GIS for ecologists. *Instructional and methodological manual*. N. Novgorod; 2009. 543 p. (In Russ.)

Katanskaya V. M. Higher aquatic vegetation. *Metodicheskie aspekty limnologicheskogo monitoringa = Methodological aspects of limnological monitoring*. Leningrad: Nauka; 1988. P. 102–113. (In Russ.)

Konograi V. A. Features of overgrowth of the Kremenchug reservoir. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2014;2:54–60. (In Russ.)

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Palynological terminology of angiosperms. Leningrad: Nauka; 1967. 86 p. (In Russ.)

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pollen and spores of plants of the flora in the European part of the USSR. Leningrad: Nauka; 1972. Vol. 1. 171 p. (In Russ.)

Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Pollen of dicotyledonous plants in the European part of the USSR. Lamiaceae – Zygophyllaceae. Leningrad: Nauka; 1978. 184 p. (In Russ.)

Nosova M. B., Severova E. E., Volkova O. A. Long-term studies of modern palynological spectra in the middle zone of the European part of Russia. *Byul. Mosk. o-va ispytatelei prirody. Otd. biol. = Bull. of Moscow Naturalists Society. Biology Dep.* 2015;120(6):42–50. (In Russ.)

Novenko E. Yu., Mazei N. G., Zernitskaya V. P. Recent spore-pollen spectra of protected areas of the European part of Russia as a key to the interpretation of the paleoecological studies results. *Nature Conservation Research*. 2017;2(2):55–65. doi: 10.24189/ncr.2017.012 (In Russ.)

Novenko E. Yu., Nosova M. B., Krasnoruckaya K. V. Features of surface spore-pollen spectra of the southern taiga of the East European Plain. *Izvestiya Tul'skogo gos. un-ta. = Proceed. TuLSU*. 2011;2:345–354. (In Russ.)

Nurminen L. Macrophyte species composition reflecting water quality changes in adjacent water bodies of Lake Hiidenvesi, SW Finland. *Ann. Bot. Fenn.* 2003;40:199–208.

Papchenkov V. G. Vegetation cover of waterbodies and streams of the Middle Volga basin. Yaroslavl'; 2001. 213 p. (In Russ.)

Pesenko Yu. A. Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies. Moscow: Nauka; 1982. 287 p. (In Russ.)

Sapelko T. V., Terekhov A. V., Amantov A. V. Ladoga transgression: reconstruction of the final stage and subsequent decline in the northern part of the lake. *Regional'naya geologiya i metallogeniya = Regional Geology and Metallogeny*. 2018;75:23–34. (In Russ.)

Sladkov A. N. Introduction to spore-pollen analysis. Moscow: Nauka; 1967. 270 p. (In Russ.)

Stepanova A. B., Voyakina E. Yu., Zueva N. V. et al. The water system of the Valaam Archipelago. Small forest lakes. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = The current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate*. St. Petersburg; 2021. P. 477–485. (In Russ.)

Toivonen H., Huttunen P. Aquatic macrophytes and ecological gradients in 57 small lakes in southern Finland. *Aquat. Bot.* 1995;51:197–22.

Vuorela I., Lempiäinen T., Saarnisto M. Land use pollen record from the Island of Valamo, Russian Karelia. *Ann. Bot. Fenn.* 2001;38:139–165.

Поступила в редакцию / received: 26.10.2022; принята к публикации / accepted: 14.09.2023.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Газизова Татьяна Юрьевна

младший научный сотрудник

e-mail: tssml@bk.ru

Русанов Александр Геннадьевич

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: a.rusanov@yahoo.com

Сапелко Татьяна Валентиновна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: tsapelko@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Gazizova, Tatyana

Junior Researcher

Rusanov, Alexander

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Sapelko, Tatyana

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

УДК 595.371 : 574.91 (282.247.212)

ОСОБЕННОСТИ СУТОЧНЫХ МИГРАЦИЙ АМФИПОД *GMELINOIDES FASCIATUS* (STEBBING, 1899) В ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ШХЕРНОГО РАЙОНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Д. С. Дудакова^{1*}, М. Д. Петухова², А. Д. Старухина¹

¹ Институт озероведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), *Judina-D@yandex.ru

² Вологодский государственный университет (ул. Ленина, 15, Вологда, Россия, 160000)

В летний период 2020 и 2021 гг. в шхерной литорали Ладожского озера проведено исследование суточных миграций амфипод *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) байкальского происхождения. Эти организмы являются важным кормовым объектом рыб и, соответственно, играют значимую роль в водных экосистемах, поддерживая их стабильность и обеспечивая высокий уровень биологических запасов. Для этого изучаемого вида характерно наличие активных перемещений – миграций. Изучение миграций амфипод и выявление мест их концентрации позволяет обнаружить потенциальные участки кормовой базы ихтиофауны. Феномен активных миграций известен для многих групп и видов гидробионтов и связан с более эффективным использованием пространства и ресурсов, защитой от хищников, перераспределением энергии. Пространственное перемещение как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении наблюдается, в частности у амфипод, в течение суток. Обычно в дневное время избегание хищников приводит к тому, что они зарываются в толщу грунта или прячутся под плотными субстратами, а со снижением освещенности выходят в толщу воды. Как показали наши исследования, важными факторами, влияющими на перемещения гмелиноидеса в мелководной литорали Ладожского озера, являются: тип биотопа, изменение температуры воды и воздуха, фаза Луны, облачность, скорость и направление ветра, освещенность, интенсивность и суммарное количество осадков. Показаны закономерности влияния этих факторов на плотность рачка. Работы позволили выявить ряд закономерностей суточной активности вида. Отмечены как вертикальные, так и горизонтальные миграции. Максимальная концентрация гмелиноидеса отмечается в промежуток между закатом и полночью и формируется за счет молодежи. Взрослые особи достигают максимума своей численности в толще воды в полночь. В дневное время амфиподы уходят из водной толщи мелководной зоны, зарываясь в мягкий грунт, или находят укрытия под каменистыми обломками.

Ключевые слова: литоральные амфиподы; скально-каменистые биотопы; зарослевые биотопы; вертикальные и горизонтальные миграции

Для цитирования: Дудакова Д. С., Петухова М. Д., Старухина А. Д. Особенности суточных миграций амфипод *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) в литоральной зоне шхерного района Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 84–96. doi: 10.17076/lim1706

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

D. S. Dudakova^{1*}, M. D. Petukhova², A. D. Starukhina¹. FEATURES OF DIEL MIGRATIONS OF *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) AMPHIPODS IN THE LITTORAL ZONE OF THE LAKE LADOGA SKERRIES REGION

¹ Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevast'yanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *Judina-D@yandex.ru

² Vologda State University (15 Lenina St., 160000 Vologda, Russia)

In the summer of 2020 and 2021, a study of diel migrations of Baikal-origin amphipods *Gmelinoides fasciatus* was conducted in the littoral zone of Lake Ladoga skerries. These organisms are an important food object for fish, and, accordingly, play a role in aquatic ecosystems, maintaining their stability and providing a high level of biological stocks. This species is noted for performing active movements, or migrations. Studying the migrations of amphipods and identifying the sites where they concentrate helps us detect the potential food-rich areas for fish. The phenomenon of active migrations is known for many groups and species of aquatic organisms and is associated with more efficient use of space and resources, protection from predators, and energy redistribution. Spatial movement, in both the vertical and the horizontal directions, is observed, in particular in amphipods, on a daily scale. As a rule, during daytime, they seek to avoid predators by burrowing into the ground or hiding under dense substrates, and as illumination decreases they re-enter the water column. As our research has shown, important factors affecting the movement of *Gmelinoides* in the shallow littoral area of Lake Ladoga are the following: the type of habitat, changes in water and air temperature, moon phase, cloud cover, wind speed and direction, illumination, precipitation intensity, and total rainfall. The study has revealed patterns in how these factors influence the population density of the crustaceans. A number of patterns were identified in the daily activity of the species. Both vertical and horizontal migrations were observed. The highest concentration of *Gmelinoides* was found between sunset and midnight and was formed by juveniles. Adults reach their maximum numbers in the water column at midnight. During the daytime, amphipods leave the water column of the shallow zone, burrowing into soft sediment or finding shelter under rocky debris.

Keywords: littoral amphipods; rocky habitats; macrophytethicket habitats; vertical and horizontal migrations

For citation: Dudakova D. S., Petukhova M. D., Starukhina A. D. Features of diel migrations of *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) amphipods in the littoral zone of the Lake Ladoga skerries region. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 84–96. doi: 10.17076/lim1706

Funding. The work was performed under of state assignment to the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – SPC RAS, theme #0154-2019-0001 “Comprehensive assessment of the dynamics of the ecosystems of Lake Ladoga and water bodies in its drainage basin under the impact of natural and anthropogenic factors”.

Введение

Миграции являются распространенным явлением, позволяющим животным наиболее рационально использовать имеющиеся ресурсы и способствующим расселению видов. Основными факторами, вызывающими миграционную активность, являются: свет, пищевые ресурсы, темпе-

ратура, пресс хищников, размножение, набор суммы температур, необходимый для развития в условиях холодноводного водоема, циркадные ритмы [Виноградов, 1959; Alldredge, King, 1985; Lindström, Fortelius, 1992; Rahkola et al., 1999; Burks et al., 2002; Barros, 2005; Мишарин и др., 2006; Семенченко, Разлуцкий, 2009; Тахтеев и др., 2019; Navarro-Barranco et al., 2020].

Среди беспозвоночных особенно сильно выражены суточные вертикальные миграции (синхронное движение на большие глубины на рассвете и подъем к поверхности в сумерках) пелагического планктона в глубоководных частях акваторий. Главную роль в миграционном комплексе часто играют ракообразные, в частности амфиподы. Последние способны совершать активные перемещения на расстояние в десятки и даже сотни метров в толще воды [Виноградов, 1959; Hiroki, 1980, 1988; Бессолицына, 2002; Meester, 2009; Bandara et al., 2021].

В мелководных частях акваторий роль вертикальных миграций несколько снижается и становятся более выраженными горизонтальные перемещения из одного биотопа в другой. На мелководье бентосные и планктонные сообщества более тесно взаимодействуют между собой, разделение между водной средой и грунтом становится более размытым [Lindström, Fortelius, 1992; Burks et al., 2002; Мишарин и др., 2006; Семенченко, Разлуцкий, 2009; Тахтеев и др., 2019; Navarro-Barranco et al., 2020].

Группу литоральных организмов (в том числе амфипод), способных как зарываться в грунт, так и активно двигаться в толще воды, часто обозначают как эмерджентный зоопланктон, подчеркивая, таким образом, их регулярное нахождение вне донного грунта в отличие от истинно бентосных видов [Navarro-Barranco et al., 2020]. Эти организмы являются важным кормовым объектом как планктоноядных, так и бентоядных видов рыб и, соответственно, играют очень важную роль в водных экосистемах, поддерживая их стабильность и обеспечивая высокий уровень биологических запасов, участвуя в ремобилизации донных отложений (биотурбации) [Бессолицына, 2002; Lomartire et al., 2021]. При изучении вертикальных миграций этой группы помимо перемещения в разных водных горизонтах рассматривается ее проникновение на разные глубины в толще грунта. Последнее тесно связано с типом грунта, его составом, механическими свойствами [Poznańska et al., 2013; Vadher, 2015; Patel et al., 2021]. Способность активно искать определенные убежища при возвращении на дно из толщи воды определяет горизонтальную пространственную сегрегацию донных видов амфипод и связано с распределением различных субстратов [Navarro-Barranco et al., 2020].

Исследование активных горизонтальных и вертикальных перемещений байкальского вселенца амфиподы *G. fasciatus* на Ладожском озере проводилось нами в бухте Петрокрепость (южная часть озера) в 2011–2012 гг.

В результате было отмечено наличие активных суточных миграций этого вида амфипод в литоральной зоне [Дудакова и др., 2015]. Исследования показали возрастные отличия в степени миграционной активности и в степени агрегированности молоди и взрослых животных. Изучение ночного миграционного комплекса, проведенное в 2020 г. Д. Ю. Карнауховым и Е. А. Курашовым, также подтвердило наличие суточных вертикальных миграций гмелиноидеса, однако менее интенсивное, чем в озере Байкал [Карнаухов, Курашов, 2020]. Следует отметить, что до сих пор суточные миграции амфипод Ладожского озера в разных его частях, в частности в северном шхерном районе, характеризующемся высоким разнообразием биотопов и сложностью подводных ландшафтов, изучены недостаточно.

Цель работы – выявить особенности суточных миграций амфипод вида *Gmelinoides fasciatus* в шхерном районе Ладожского озера в местах распространения различных биотопов.

Материалы и методы

Исследования проводились в течение двух лет в шхерном районе Ладожского озера на островах Ристисаари (с 23 июля по 8 августа 2020 г.) и Пелотсаари (с 4 по 12 августа 2021 г.). На о. Ристисаари работы велись на восьми станциях (рис. 1, А), на о. Пелотсаари – на четырех станциях (рис. 1, Б). Диапазон исследованных глубин 0,5–1 м. На исследованных участках были представлены различные биотопы; на первом преобладали зарослевые, на втором – скально-каменистые. Бухты, где проводились исследования, отличались по форме и по степени закрытости от гидродинамического воздействия.

Для выявления особенностей перемещений амфипод на исследуемых станциях несколько раз в сутки (в разные периоды с контрастной освещенностью) на участках с глубинами 1 м с помощью бентосного сачка (газ с размером ячеи 120 мкм) с диаметром входного отверстия 25 см проводился вылов организмов, встречающихся в толще воды. На каждой станции выполнялось 10 обловов при ходе сачка по траектории в виде восьмерки (длина пути, пройденного сачком за один облов, составляет приблизительно 3 м). Одновременно с этим на скально-каменистых биотопах и биотопах каменистых пляжей осматривались разноразмерные скальные обломки (по 10 штук с каждой точки). В период уменьшения своей суточной активности рачки цеплялись к нижней части камней и не уплывали при извлечении

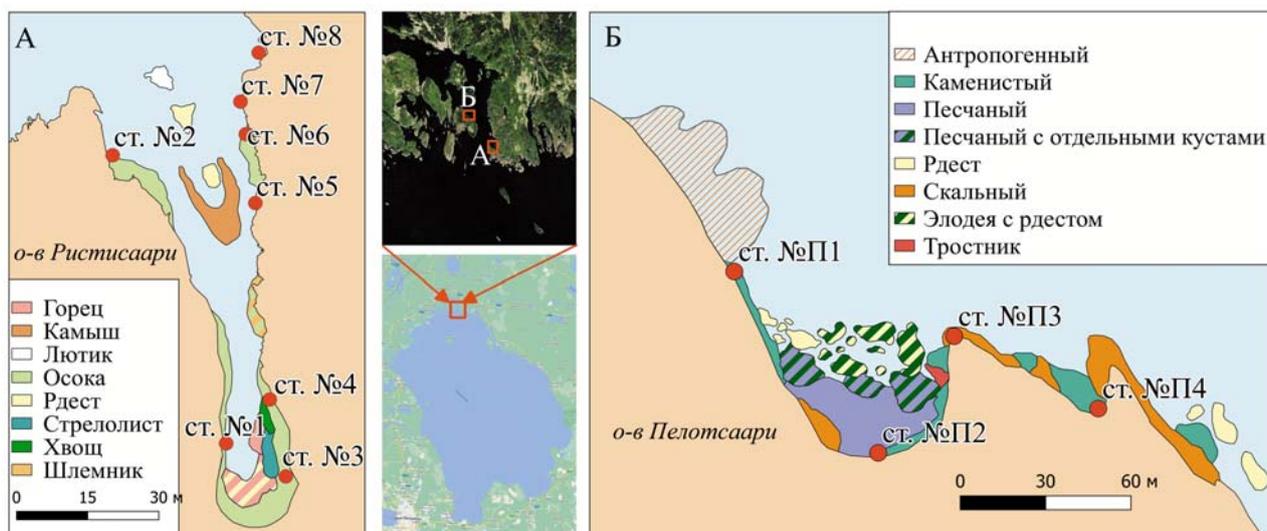


Рис. 1. Районы исследования и размещение станций отбора проб в исследованных бухтах на островах Ристисаари (А) и Пелотсаари (Б)

Fig. 1. Research areas and sampling stations in the studied bays on the islands of Ristisaari (A) and Pelotsaari (B)

обломка из воды, что обеспечивало возможность подсчета укрывающихся особей. Во всех случаях проводился учет численности выловленных амфипод, среди которых выделялись: рачки младших возрастов длиной менее 3 мм (отнесены к категории мейзообентос), старших возрастов и половозрелые (взрослые) самцы и самки. Параллельно с учетом суточной активности амфипод проводились метеорологические и астрономические наблюдения (фаза Луны, температура воздуха, атмосферное давление, облачность, скорость и направление ветра, интенсивность осадков; в 2021 г. помимо перечисленных параметров также учитывалась освещенность) и измерялась температура воды. В 2020 г. суточная температура воздуха за весь период проведения исследования миграций гмелиноиде-са колебалась в пределах 14,5–25,0°; воды – 14,0–20,2° (суточная разница между температурой воды в полдень и полночь составляла от 0,9 до 2,1°); суточное количество осадков – от 0 до 4,7 мм. Максимальное число осадков выпало 28.07.2020 г., в другие дни дожди были слабыми и непродолжительными. В 2021 г. суточная температура воздуха колебалась в пределах 14,8–20,0°; воды – 16,0–18,9° (суточная разница – от 0,6 до 1,2°); осадков в период исследований было мало – от 0 до 0,1 мм/сут., дожди практически отсутствовали.

Собраны данные за 58 временных периодов (34 в 2020 г. и 24 в 2021 г.). Отбор проб амфипод осуществлялся дважды в сутки в 2020 г. (в полдень и полночь) и четырежды – в 2021 г.

(на закате, в полночь, на восходе и в полдень). На некоторых станциях (ст. 1 и 2 в 2020 г. и ст. П4 в 2021 г.) исследования проводились с временным промежутком между отбором проб от 1 до 4 часов.

Статистическая обработка полученного массива данных выполнена в программе Statistica.

Результаты и обсуждение

При суммарном количестве обловов 167 в образцах обнаружено в общей сложности 5952 экземпляра амфипод. Встречено два литоральных вида: *Gammarus lacustris* (Sars, 1863) и *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899). Однако выраженная миграционная активность проявлялась только для последнего. Нативный вид *G. lacustris* в Ладожском озере почти полностью вытеснен байкальским вселенцем. В районе о. Ристисаари обнаружена единичная особь гаммаруса, на мелководье о. Пелотсаари – небольшая популяция, сконцентрированная на очень небольшом участке с заросшим дном. В пробах из толщи воды этот вид отсутствовал. Активные миграции амфипод именно байкальского происхождения в литорали и сублиторали Ладожского озера отмечены и в предшествующих исследованиях [Дудакова и др., 2015; Карнаухов, Курашов, 2020].

Вертикальные перемещения. В результате проведенных работ показано, что в ночное время происходит выход амфипод вида *Gmelinoides fasciatus* в толщу воды и уменьшение их числа под камнями (рис. 2).

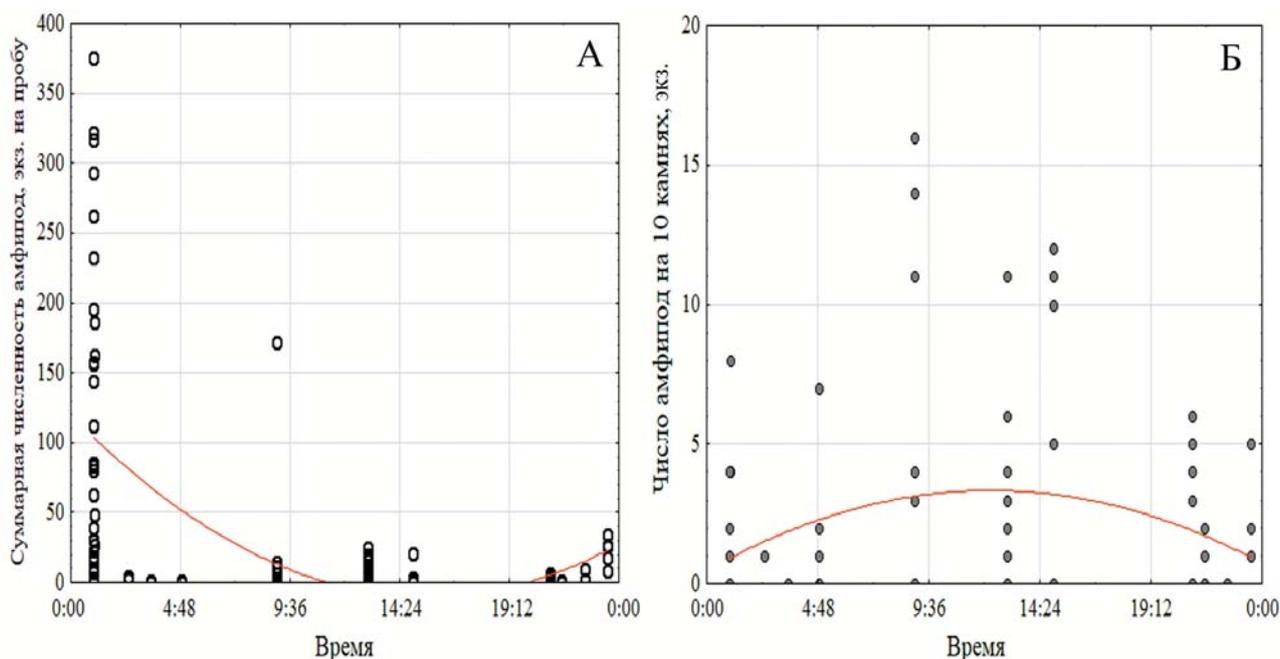


Рис. 2. Суточное изменение суммарной численности амфипод в толще воды (А) и под обломками (Б) на разных биотопах по данным наблюдений 2020–2021 гг.

Fig. 2. Daily change in the number of amphipods in the water column (A) and under debris (Б) at different biotopes according to observations in 2020–2021

В среднем за весь период исследований число рачков, выловленных в толще воды ночью (полночь), было в 37 раз выше по сравнению с дневными (полдень) показателями численности (табл. 1).

Наиболее полный ряд суточных данных, представленный для ст. П4 (2021 г.), позволил выявить максимальную концентрацию амфипод в толще воды через два часа после заката, во временной период около 23.30 (рис. 3, А). На всех других станциях, исследованных в 2021 г., в это время также отмечалась наивысшая концентрация амфипод в толще воды. Высокие значения численности были обусловлены

прежде всего выходом молоди. Взрослые крупные особи массово выходили в воду позднее – ближе к полуночи (рис. 3, Б). Подобная закономерность проявлялась для всех других станций, кроме ст. П1.

Проведенными исследованиями установлено, что биотопы, представленные каменистым субстратом, служат одним из вариантов убежища для гмелиноидеса в дневное время. Как сказано выше, под каменистыми обломками отмечалось большее концентрирование рачков днем по сравнению с ночным периодом (рис. 2, Б). Наиболее высокое число рачков отмечено для периода с 9.00 до 15.00.

Таблица 1. Межгодовые различия средней численности амфипод с исследованных станций островов Ристисаари и Пелотсаари в разное время суток

Table 1. Interannual differences in the average number of amphipods of the studied stations of Ristisaari and Pelotsaari islands at different times of the day

Год Year	Преобладающие биотопы Prevailing biotopes	Время суток Time of day	$N_{total\ amph}^1$ экз./пробу $N_{total\ amph}^2$ sp./sample
2020	растительные vegetable	полдень noon	$5 \pm 1,3$
		полночь midnight	$185 \pm 38,5$
2021	скально-каменистые rocky	полдень noon	0
		полночь midnight	$9 \pm 2,4$

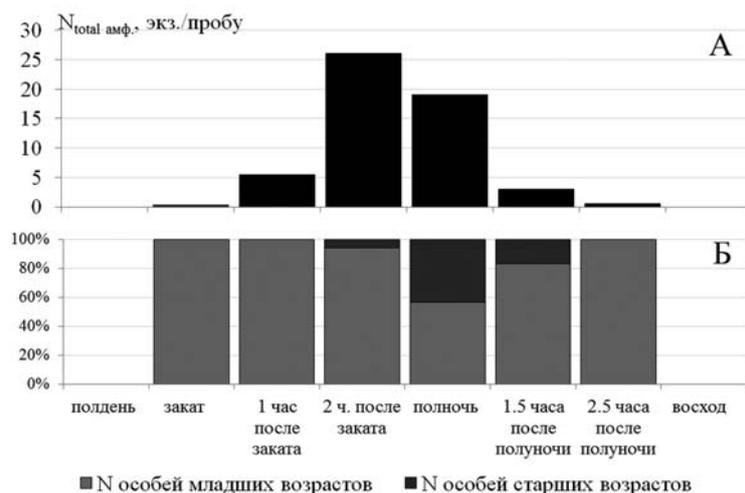


Рис. 3. Суточные изменения численности амфипод в толще воды на ст. П4 полигона на о. Пелотсаари

Fig. 3. Daily changes in the number of amphipods in the water column at Station П4 of the study polygon on the island of Pelotsaari

Горизонтальные перемещения гмелиноидеса фиксировались по суточным изменениям плотности рачков в толще воды на разных станциях. В заросшей бухте о. Ристисаари наибольшая концентрация амфипод отмечена ночью в зарослях осоки (рис. 4, А: ст. 4 и 6; рис. 5), особенно велика она была в кутовой части бухты (рис. 4, А: ст. 4). Причем доля крупных особей молоди старших возрастов и взрослых среди осоки оказалась выше, чем на всех остальных

биотопах (рис. 4, А: ст. 3, 4 и 6). На скальных и каменистых биотопах о. Пелотсаари, в том числе в бухте, число амфипод было на один порядок ниже, чем в бухте о. Ристисаари. Наименьшие значения средней численности амфипод в толще воды отмечены для ст. П3 в районе каменистого пляжа в кутовой части бухты (рис. 4, Б); наибольшие средние величины численности представлены для ст. П4 в вогнутой части мыса (рис. 4, Б; рис. 6).

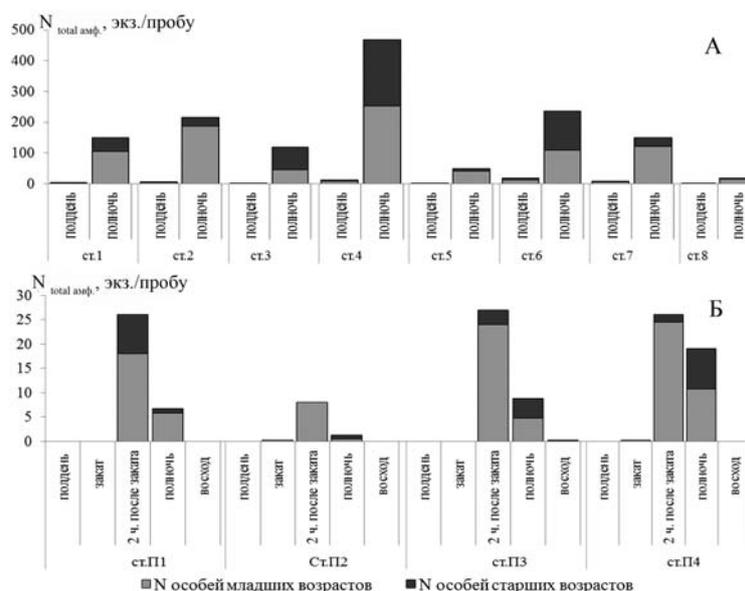


Рис. 4. Изменение численности амфипод *Gmelinoides fasciatus* в толще воды на станциях о. Ристисаари (А) и о. Пелотсаари (Б) в разные периоды суток

Fig. 4. Changes in the number of amphipods *Gmelinoides fasciatus* in the water column at the stations of Ristisaari Island (А) and Pelotsaari Island (Б) in different periods of the day

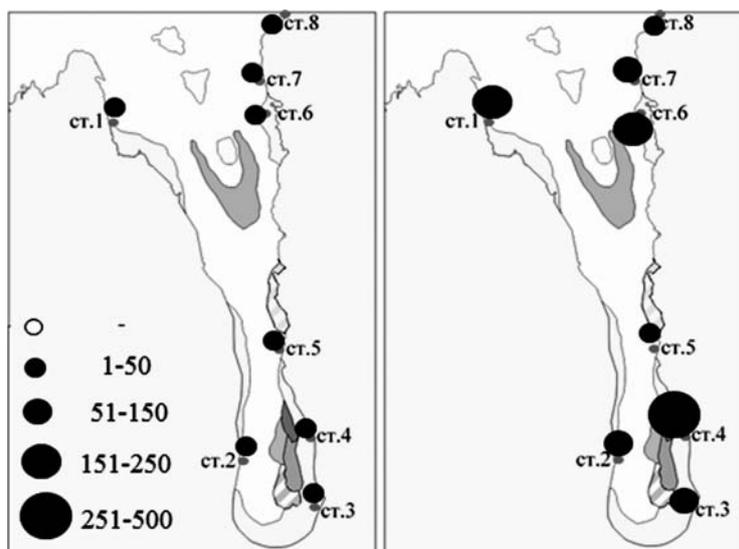


Рис. 5. Изменение общей численности амфипод (экз./пробу) в толще воды на станциях полигона о. Ристисаари в разные периоды суток – в полдень (слева) и в полночь (справа) по усредненным данным за 23.07–08.08.2020 гг.

Fig. 5. Change in the density of amphipods (sp./sample) in the water column at the stations of the Ristisaari Island landfill at different periods of the day (at noon – on the left and at midnight – on the right) according to the averaged data for 23.07–08.08.2020

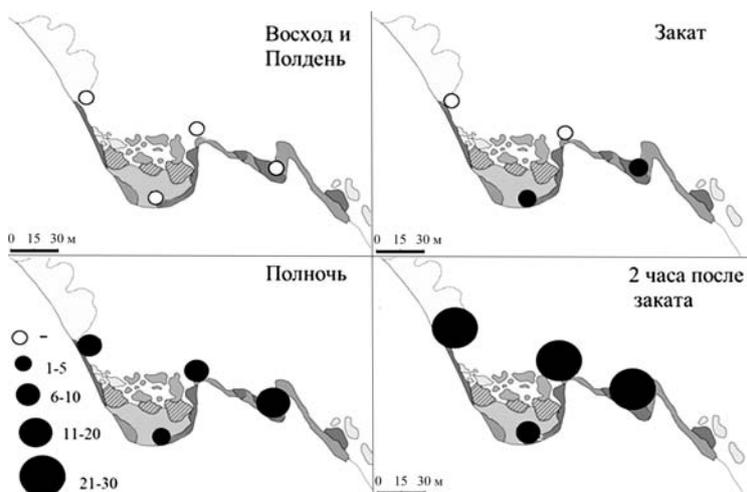


Рис. 6. Изменение численности амфипод (экз./пробу) в толще воды на станциях полигона о. Пелотсаари в разные периоды суток по усредненным данным за период 04–12.08.2021 г.

Fig. 6. Change in the density of amphipods (sp./sample) in the water column at the stations of the Pellotsaari Island landfill in different periods of the day according to the averaged data for the period 04–12.08.2021

Таким образом, в ночное время концентрирование амфипод в толще воды неоднородно на разных станциях, и в целом они избирают более сложно структурированные биотопы (рис. 7, А). Там, где имеются заросли, рачки однозначно предпочитают заросшую литораль по сравнению с каменистой, и их горизонтальные перемещения связаны

с переходом в зону растительности (рис. 5 и 6). В условиях преобладания незаросших скально-каменистых биотопов определяющим фактором, влияющим на распределение амфипод, становятся, вероятно, особенности гидродинамики, связанные с формой береговой линии и пространственной сложностью каменистых биотопов.

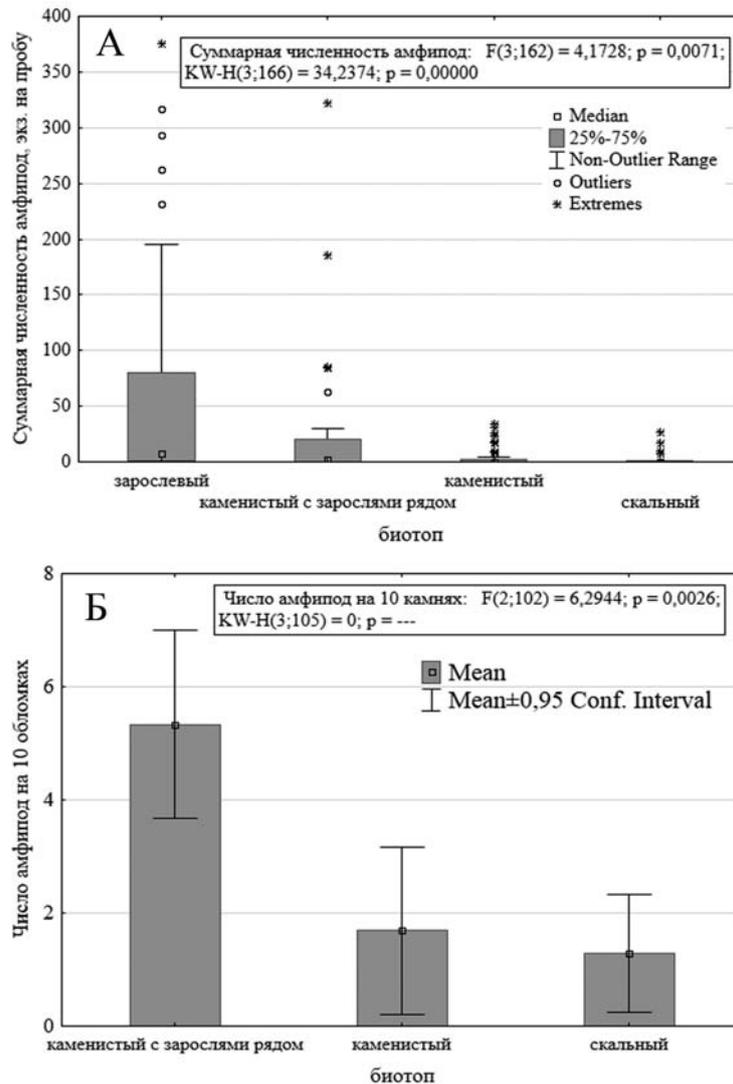


Рис. 7. Общая численность амфипод в толще воды (А) и на каменных обломках (Б) на разных типах биотопов исследованных участков в полночь (по результатам 2020–2021 гг.)

Fig. 7. The total number of amphipods in the water column (A) and on rocky fragments (Б) on different types of biotopes of the studied sites at midnight (according to the results in 2020–2021)

Согласно нашим данным, суточные изменения числа амфипод, укрывающихся под обломками, еще более существенно связаны с типом биотопов. Это указывает на наличие горизонтальных перемещений в избираемые рачками привлекательные участки. Наиболее предпочитаемыми являются обломки в зарослевой зоне литорали или каменистые пляжи с примыкающими зарослями макрофитов (рис. 7, Б). Больше амфипод было сосредоточено на участках с крупными и средними обломками. Между скалами и открытыми каменистыми пляжами достоверные отличия отсутствуют. В целом на обломках число

бокоплавов было несколько больше, чем на скалах.

Влияние фазы Луны и погодных условий.

Статистически значимых изменений в количестве мигрирующих рачков в зависимости от лунной освещенности и фазы Луны не выявлено. Однако отмечен общий тренд в усилении миграционной активности с повышением ночной освещенности (рис. 8). Это соответствует общей закономерности, проявляющейся в водоемах разных типов. Например, для планктонных видов ракообразных также известно, что наиболее активно вертикальные миграции проявляются в полнолуние [Rios-Jara, 2005].

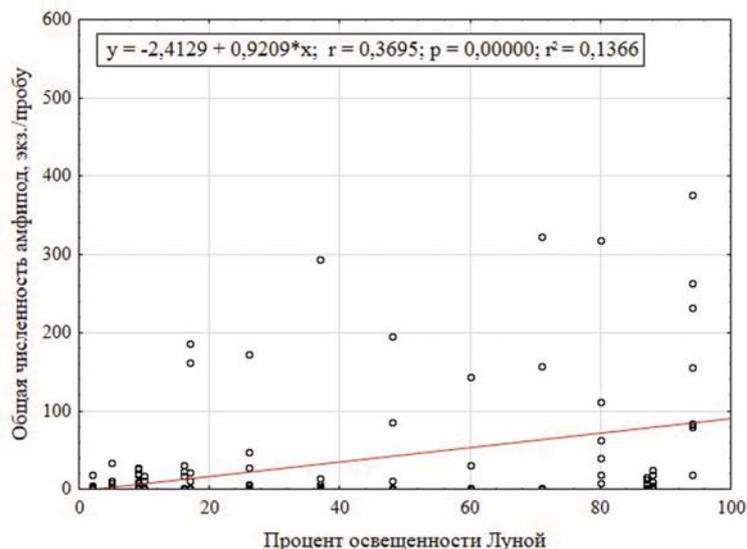


Рис. 8. Влияние фаз луны на суточную активность амфипод по числу выхода рачков в толщу воды

Fig. 8. The influence of the moon phases on the daily activity of amphipods by the number of crustaceans entering the water column

На показатель численности амфипод, мигрирующих в толщу воды, существенное влияние оказывало изменение температуры воды. Охлаждение водных масс приводит к увеличению активности рачков (рис. 9). В. В. Тахтеев с соавторами [2019] представляют гипотезу, объясняющую суточные вертикальные миграции наличием вертикального температурного градиента и поиском амфиподами наиболее оптимальных температурных условий. Рачки

всплывают, чтобы оказаться в наиболее теплых слоях воды, быстрее набрать необходимую сумму температур и тем самым ускорить процесс полового созревания.

Существенным фактором, определяющим пространственную изменчивость численности гмелиноидеса, явилось различие биотопов, что вызывает появление горизонтальных миграций, особенности которых описаны выше.

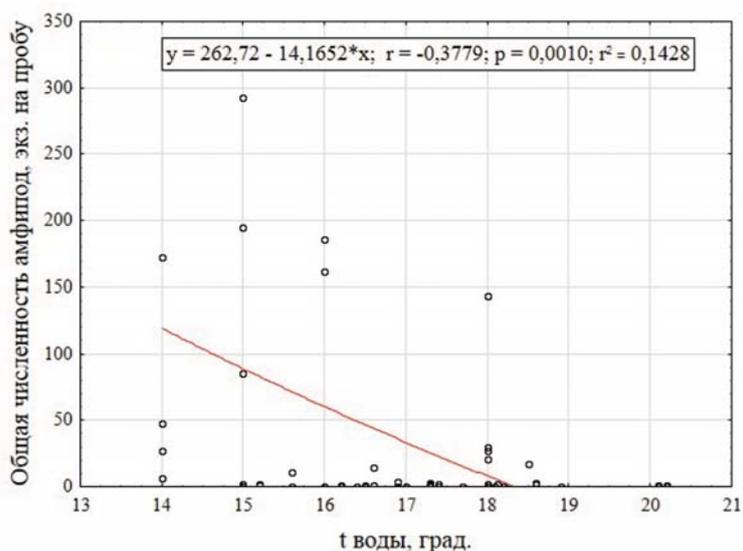


Рис. 9. Зависимость численности амфипод в толще воды от температуры воды

Fig. 9. Dependence of the density of amphipods in the water column on the water temperature

Еще один фактор – облачность. Миграционная активность рачков усиливается с увеличением облачности. Однако ее изменения не имеют прямого характера. В дневное и ночное время наиболее высокие значения численности амфипод, мигрирующих в толщу воды, наблюдались при переменной облачности (табл. 2). При этом встречаемость бокоплавов под обломками увеличивалась с возрастанием облачности. Влияние фактора облачности мало отражено в научной литературе. Недавние океанические исследования зоопланктона обнаружили ранее недоучитываемые «мини-

миграции», связанные с изменением дневного светового потока из-за степени покрытия неба облаками [Omand et al., 2021]. Это исследование показало, что когда сгущающийся облачный покров не позволяет солнечному свету проникать глубоко в океан, зоопланктон плывет к поверхности, чтобы оставаться в воде с предпочтительной яркостью. Когда облака рассеивались, он снова опускался.

Выпадение осадков также влияет на степень миграционной активности. Наиболее активным гмелиноидес оказывается в условиях дней с небольшим количеством осадков (рис. 10).

Таблица 2. Изменение численности амфипод в толще воды и под камнями в зависимости от облачности в течение суток

Table 2. Change in the number of amphipods in the water column and under rocks depending on the clouds during the day

Облачность Cloudiness	Средняя численность амфипод в толще воды, экз. на пробу Average number of amphipods in the water column, sp. per sample	Средняя численность амфипод под обломками, экз./10 обломков Average number of amphipods under debris, sp./10 pieces of debris
Ясно Clear	1,00 ± 0,73	1,50 ± 0,67
Низкая Low	2,00 ± 1,04	2,11 ± 0,93
Средняя Average	17,00 ± 11,98	2,44 ± 1,06
Высокая High	12,83 ± 7,29	5,67 ± 1,32

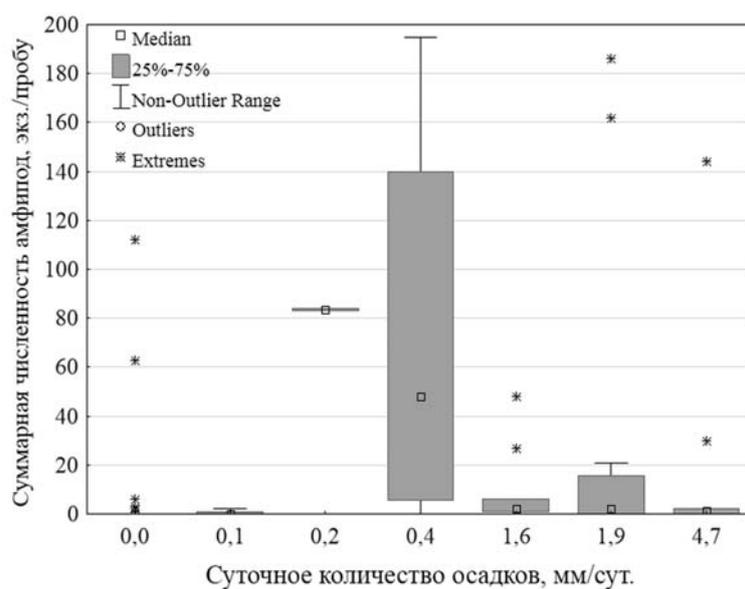


Рис. 10. Зависимость численности амфипод в толще воды от количества осадков

Fig. 10. Dependence of the number of amphipods in the water column on the amount of precipitation

Заключение

Исследования миграционной активности амфипод байкальского происхождения *Gmelinoides fasciatus*, являющихся в настоящий период важным компонентом литоральных экосистем Ладожского озера, показали наличие у них суточных вертикальных и горизонтальных перемещений. Появление в озере мигрирующих литоральных видов чужеродных бокоплавов имеет последствия для прибрежных экологических процессов, таких как связь среды обитания и доступность ресурсов (например, потоки питательных веществ между скалистыми и осадочными местообитаниями, вызванные ежедневной горизонтальной миграцией большого числа особей). Это является важным для учета кормовой базы ихтиофауны озера и для анализа развития популяции рачка-вселенца, понимания стратегий его активности и способов защиты от пресса хищников.

Представляется важным проведение дальнейших работ по выявлению наиболее значимых факторов, определяющих интенсивность миграционного процесса литоральных амфипод. Возникает необходимость исследования коэволюции поведенческих механизмов хищников, потребляющих гмелиноидеса в качестве пищи, и бокоплавов, т. е. связи миграционной активности рыб с суточными перемещениями амфипод.

Литература

Бессолицына И. А. Суточные вертикальные миграции бентосных амфипод озера Байкал: Дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2002. 183 с.

Виноградов М. Е. К вопросу о вертикальных группировках морского зоопланктона // Тр. ИОАН СССР. 1959. Т. 30. С. 100–106.

Дудакова Д. С., Родионова Н. В., Протопопова Е. В., Капустина Л. Л., Бардинский Д. С. Состав и динамика гидробионтов литорали бухты Петрокрепость Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 2. С. 53–70. doi: 10.17076/eco42

Карнаухов Д. Ю., Курашов Е. А. К вопросу о ночных вертикальных миграциях амфипод в Ладожском озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 115–124. doi: 10.17076/lim1140

Мишарин А. С., Тахтеев В. В., Левашкевич А. М. Сравнительная характеристика ночной миграционной активности гидробионтов на различных участках литорали озера Байкал // Гидробиология водоемов юга Восточной Сибири (Биоразнообразие байкальского региона: Труды Биолого-почвенного факультета ИГУ. Вып. 6). Иркутск: Иркут. ун-т, 2006. С. 52–66.

Семенченко В. П., Разлуцкий В. И. Факторы, определяющие суточное распределение и перемещения зоопланктона в литоральной зоне пресновод-

ных озер (обзор) // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2009. № 2. С. 191–225.

Тахтеев В. В., Карнаухов Д. Ю., Говорухина Е. Б., Мишарин А. С. Суточные вертикальные миграции гидробионтов в прибрежной зоне оз. Байкал // Биология внутренних вод. 2019. № 2–1. С. 50–61. doi: 10.1134/S0320965219020141

Allredge A. L., King J. M. The distance demersal zooplankton migrate above the benthos: implications for predation // Marine Biology. 1985. Vol. 84. P. 253–260. doi: 10.1007/BF00392494

Bandara K., Varpe Ø., Wijewardene L., Tverberg V., Eiane K. Two hundred years of zooplankton vertical migration research // Biol. Rev. 2021. Vol. 96. P. 1547–1589. doi: 10.1111/brv.12715

Barros F. Evaluating the importance of predation on subtidal benthic assemblages in sandy habitats around rocky reefs // Acta Oecologica. 2005. Vol. 27. P. 211–223. doi: 10.1016/j.actao.2005.01.002

Burks R. L., Lodge D. M., Jeppesen E., Lauridsen T. L. Diel horizontal migration of zooplankton: costs and benefits of inhabiting the littoral // Freshwater Biology. 2002. Vol. 47. P. 343–365. doi: 10.1046/j.1365-2427.2002.00824.x

Hiroki M. Relation between diel vertical migration and locomotor activity of a marine hyperiidean amphipod, *Themisto japonica* (Bovallius) // J. Crustac. Biol. 1988. Vol. 8, no. 1. P. 48–52. doi: 10.2307/1548429

Hiroki M. Relation between the two diel phenomena shown by freshwater gammarids – drift and vertical migrations // Crustaceana. 1980. Sup. 6. P. 182–193. URL: <http://www.jstor.org/stable/25027525>

Lindström M., Fortelius W. Factors affecting the horizontal migration of the amphipod *Pontoporeia affinis* Lindström. II. Effects of temperature, salinity and substratum // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 1992. Vol. 158, no. 2. P. 231–248. doi: 10.1016/0022-0981(92)90229-4

Lomartire S., Marques J. C., Gonçalves A. M. M. The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment // Ecological Indicators. 2021. Vol. 129. P. 1–8. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107867

Meester L. D. Diel vertical migration // Encyclopedia of Inland Waters / Ed. G. E. Likens. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2009. P. 651–658.

Navarro-Barranco C., Irazabal A., Moreira J. Demersal amphipod migrations: spatial patterns in marine shallow waters // J. Mar. Biol. Assoc. U. K. 2020. Vol. 100, no. 2. P. 1–11. doi: 10.1017/S002531542000003X

Omand M. M., Steinberg D. K., Stamieszkin K. Cloud shadows drive vertical migrations of deep-dwelling marine life // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2021. Vol. 118, no. 32. e2022977118. doi: 10.1073/pnas.2022977118

Patel C., Vadher A. N., Mathers K. L., Dwyer C., Wood P. J. Body size affects the vertical movement of benthic amphipods through subsurface sediments in response to drying // Hydrobiologia. 2021. Vol. 848. P. 1015–1025. doi: 10.1007/s10750-020-04500-x

Poznańska M., Kakareko T., Krzyżyński M., Kobak J. Effect of substratum drying on the survival and migrations of Ponto-Caspian and native gammarids (Crustacea: Amphipoda) // Hydrobiologia. 2013. Vol. 700. P. 47–59. doi: 10.1007/s10750-014-2130-z

Rahkola M., Avinski V., Holopainen A.-L., Jurvelius J., Karjalainen J., Viljanen M. Inter-acting in the dark: a study of the diel vertical migrations of pelagic plankton and fish in Lake Ladoga // *Boreal Environment Research*. 1999. No. 4. P. 245–255.

Rios-Jara E. Effects of lunar cycle and substratum preference on zooplankton emergence in a tropical, shallow-water embayment, in Southwestern Puerto Rico // *Caribbean Journal of Science*. 2005. Vol. 41, no. 1. P. 108–123.

Vadher A. N., Stubbington R., Wood P. J. Fine sediment reduces vertical migrations of *Gammarus pulex* (Crustacea: Amphipoda) in response to surface water loss // *Hydrobiologia*. 2015. Vol. 753. P. 61–71. doi: 10.1007/s10750-015-2193-5

References

Allredge A. L., King J. M. The distance demersal zooplankton migrate above the benthos: implications for predation. *Marine Biology*. 1985;84:253–260. doi: 10.1007/BF00392494

Bandara K., Varpe Ø., Wijewardene L., Tverberg V., Eiane K. Two hundred years of zooplankton vertical migration research. *Biol. Rev.* 2021;96:1547–1589. doi: 10.1111/brv.12715

Barros F. Evaluating the importance of predation on subtidal benthic assemblages in sandy habitats around rocky reefs. *Acta Oecologica*. 2005;27:211–223. doi: 10.1016/j.actao.2005.01.002

Bessolitsyna I. A. Daily vertical migrations of benthic amphipods of Lake Baikal: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Irkutsk; 2002. 183 p. (In Russ.)

Burks R. L., Lodge D. M., Jeppesen E., Lauridsen T. L. Dial horizontal migration of zooplankton: costs and benefits of inhabiting the littoral. *Freshwater Biology*. 2002;47:343–365. doi: 10.1046/j.1365-2427.2002.00824.x

Dudakova D. S., Rodionova N. V., Protopopova E. V., Kapustina L. L., Bardinskii D. S. Composition and dynamics of hydrobionts of the littoral of the Petrokrepost Bay of Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2015;2:53–70. doi: 10.17076/eco42 (In Russ.)

Hiroki M. Relation between diel vertical migration and locomotor activity of a marine hyperiidean amphipod, *Themisto japonica* (Bovallius). *J. Crustac. Biol.* 1988;8(1):48–52. doi: 10.2307/1548429

Hiroki M. Relation between the two diel phenomena shown by freshwater gammarids – drift and vertical migrations. *Crustaceana*. 1980;6:182–193. URL: <http://www.jstor.org/stable/25027525>

Karnaukhov D. Yu., Kurashov E. A. On the question of nocturnal vertical migrations of amphipods in Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;4:115–124. doi: 10.17076/lim1140 (In Russ.)

Lindström M., Fortelius W. Factors affecting the horizontal migration of the amphipod *Pontoporeia affinis* Lindström. II. Effects of temperature, salinity and substratum. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1992;158(2):231–248. doi: 10.1016/0022-0981(92)90229-4

Lomartire S., Marques J. C., Gonçalves A. M. M. The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment. *Ecological Indicators*. 2021;129:1–8. doi: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107867

Meester L. D. Diel vertical migration. *Likens G. E. (ed.)*. Encyclopedia of Inland Waters. Amsterdam; Boston: Elsevier; 2009. P. 651–658.

Misharin A. S., Takhteev V. V., Levashkevich A. M. Comparative characteristics of nocturnal migration activity of hydrobionts in various areas of the littoral of Lake Baikal. *Gidrobiologiya vodoemov yuga Vostochnoi Sibiri (Bioraznoobrazie baikal'skogo regiona: Trudy Biologo-pochvennogo fakul'teta IGU. Vyp. 6) = Hydrobiology of reservoirs in the South of Eastern Siberia (Biodiversity of the Baikal region: Proceedings of the Biology and Soil Faculty of the ISU. Iss. 6)*. Irkutsk: Irkut. un-t; 2006. P. 52–66. (In Russ.)

Navarro-Barranco C., Irazabal A., Moreira J. Demersal amphipod migrations: spatial patterns in marine shallow waters. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 2020;100(2):1–11. doi: 10.1017/S002531542000003X

Omand M. M., Steinberg D. K., Stamieszkin K. Cloud shadows drive vertical migrations of deep-dwelling marine life. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2021;118(32):e2022977118. doi: 10.1073/pnas.2022977118

Patel C., Vadher A. N., Mathers K. L., Dwyer C., Wood P. J. Body size affects the vertical movement of benthic amphipods through subsurface sediments in response to drying. *Hydrobiologia*. 2021;848:1015–1025. doi: 10.1007/s10750-020-04500-x

Poznańska M., Kakareko T., Krzyżyński M., Kobak J. Effect of substratum drying on the survival and migrations of Ponto-Caspian and native gammarids (Crustacea: Amphipoda). *Hydrobiologia*. 2013;700:47–59. doi: 10.1007/s10750-014-2130-z

Rahkola M., Avinski V., Holopainen A.-L., Jurvelius J., Karjalainen J., Viljanen M. Inter-acting in the dark: a study of the diel vertical migrations of pelagic plankton and fish in Lake Ladoga. *Boreal Environment Research*. 1999;4:245–255.

Rios-Jara E. Effects of lunar cycle and substratum preference on zooplankton emergence in a tropical, shallow-water embayment, in Southwestern Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*. 2005;41(1):108–123.

Semenchenko V. P., Razluckij V. I. Factors determining the daily distribution and movement of zooplankton in the littoral zone of freshwater lakes (a review). *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2009;2:191–225. (In Russ.)

Takhteev V. V., Karnaukhov D. Yu., Govorukhina E. B., Misharin A. S. Daily vertical migrations of hydrobionts in the coastal zone of Lake Baikal. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2019;2-1:50–61. doi: 10.1134/S0320965219020141 (In Russ.)

Vadher A. N., Stubbington R., Wood P. J. Fine sediment reduces vertical migrations of *Gammarus pulex* (Crustacea: Amphipoda) in response to surface water loss. *Hydrobiologia*. 2015;753:61–71. doi: 10.1007/s10750-015-2193-5

Vinogradov M. E. On the question of vertical groupings of marine zooplankton. *Tr. IOAN SSSR = Proceedings of the Oceanology Institute of the Academy of Science of the USSR*. 1959;30:100–106. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 23.09.2022; принята к публикации / accepted: 16.03.2023.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Дудакова Дина Сергеевна

канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории гидробиологии

e-mail: judina-d@yandex.ru

Петухова Мария Денисовна

студентка

e-mail: petuhova.hss@gmail.com

Старухина Анна Дмитриевна

младший научный сотрудник лаборатории гидробиологии

e-mail: wcat.lov3r@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Dudakova, Dina

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

Petukhova, Maria

Student

Starukhina, Anna

Junior Researcher

УДК 579.68

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ КАЗАНКИ ПО МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

О. В. Морозова

*Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан
(ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420089)*

Проведена микробиологическая оценка качества воды в устьевой области реки Казанки (Республика Татарстан) в летний период 2021 года. Определяли общую численность бактериопланктона, сапрофитных, олиготрофных, денитрифицирующих и нитрифицирующих бактерий. Вода по всем показателям оценивается как «слабозагрязненная» и «загрязненная», т. е. II-III класса качества. Высокие значения общей численности бактериопланктона сохраняются в течение всего периода исследований. В июне число олиготрофных бактерий превышает численность сапрофитных в составе бактериопланктона, а к концу лета уже преобладают сапрофитные бактерии, что свидетельствует о загрязнении водного объекта и накоплении органического вещества. Экосистема устьевой области реки характеризуется более высокой численностью нитрифицирующих бактерий по сравнению с денитрифицирующими, что свидетельствует об активном процессе минерализации аммонийного азота.

Ключевые слова: бактериопланктон; сапрофитные бактерии; олиготрофные бактерии; нитрифицирующие бактерии; денитрифицирующие бактерии; река Казанка; устьевая область

Для цитирования: Морозова О. В. Оценка качества воды устьевой области реки Казанки по микробиологическим показателям // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 97–106. doi: 10.17076/lim1761

O. V. Morozova. ASSESSMENT OF THE KAZANKA RIVER MOUTH WATER QUALITY BY MICROBIOLOGICAL INDICATORS

Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Russia (28 Daur'skaya St., 420089 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia)

Microbiological assessment of the water quality in the mouth of the Kazanka River (Tatarstan Republic) was carried out in the summer of 2021. The total numbers of bacterioplankton, saprophytic, oligotrophic, denitrifying and nitrifying bacteria were determined. The water is classified as "slightly polluted" and "polluted", i. e. quality class II-III, by all indicators. Bacterioplankton remained highly abundant throughout the study period. In June, oligotrophic bacteria outnumbered saprophytic ones, but in the end of the summer, saprophytic bacteria turned into the dominant group, pointing to water pollution and organic matter accumulation. Nitrifying bacteria were more abundant than denitrifying bacteria in the river mouth ecosystem, which indicates an active ammonium nitrogen mineralization process.

Keywords: bacterioplankton; saprophytic bacteria; oligotrophic bacteria; nitrifying bacteria; denitrifying bacteria; Kazanka River; mouth section

For citation: Morozova O. V. Assessment of the Kazanka River mouth water quality by microbiological indicators. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 97–106. doi: 10.17076/lim1761

Введение

Водные ресурсы Республики Татарстан включают запасы воды в реках, озерах, прудах и водохранилищах, а также верхние горизонты пресных подземных вод. Малые реки являются важным компонентом природного комплекса и в то же время объектом хозяйственной деятельности. Следует отметить, что в последние десятилетия антропогенная нагрузка на малые реки республики интенсивно возрастала.

Река Казанка – один из притоков Волги, относится к малым рекам, ее длина 142 км и водосборная площадь 2600 км². Устьевая область р. Казанки расположена в черте г. Казани, в зоне подпора водами Куйбышевского водохранилища (р. Волга). Как любой водный объект, расположенный в центре мегаполиса, р. Казанка испытывает сильную антропогенную нагрузку [Абрамова, Токинова, 2020, 2023]. Устьевая область реки подвержена загрязнению сбросами сточных вод нескольких крупных промышленных предприятий, диффузным стоком с сельскохозяйственных угодий и животноводческих комплексов, а также сточными водами городской ливневой канализации.

Река Казанка пополняет Куйбышевское водохранилище, являющееся крупнейшим в мире. Водоохранилище осуществляет сезонное, недельное и суточное регулирование стока Волги, широко применяется для потребностей энергетики, сельского хозяйства, транспорта, коммунального и промышленного водоснабжения, рекреации и т. д. Куйбышевское водохранилище также является крупнейшим техногенным водным объектом, принимает сточные воды от крупных городов и промышленных предприятий. Предприятия города вносят вклад в увеличение концентраций аммония и нитритов, металлов и органических веществ [Шагидуллин и др., 2011].

Значительная часть экологических исследований р. Казанки затрагивала изучение ее гидрохимического режима и различных гидробиологических показателей. Известно, что экологическое состояние исследуемого участка характеризуется низким качеством воды, на протяжении последних лет наблюдается цветение цианобактерий, что ведет к снижению экс-

плуатационно-хозяйственной и рекреационной ценности водного объекта [Шагидуллин и др., 2017; Абрамова, Токинова, 2020; Абрамова и др., 2021].

Планктонные микроорганизмы играют главную роль в деструкции органического вещества и в самоочищении гидросистемы. Загрязнение поверхностных вод быстро влияет на состояние планктонных микробных сообществ, поэтому особенности их развития являются важными показателями для оценки трофности и степени загрязненности водоемов [Копылов, Косолапов, 2011; РД 52.24.309-2016; Adamovich et al., 2019].

Первые микробиологические исследования устьевой области реки Казанки проведены в летний период 2020 г. Анализировалось экологическое состояние этого участка реки на основании подсчета общей численности планктонных и бентосных бактерий [Морозова и др., 2021].

Ввиду слабой изученности микробных сообществ р. Казанки и важности данной группы для комплексной оценки экосистемы реки целью исследования является оценка качества воды устьевого участка р. Казанки по показателям бактериопланктона в летний период. Для этого решались следующие задачи: установить показатели общей численности бактериопланктона и отдельных эколого-трофических групп водных микроорганизмов.

Актуальность исследования также определяется влиянием устьевой области реки Казанки на формирование биоценоза, качество воды и гидрологический режим Куйбышевского водохранилища. Результаты исследований важны для проведения комплексной оценки состояния водных ресурсов региона и могут найти применение при планировании природоохранных мероприятий по улучшению экологического состояния городских водных объектов.

Материалы и методы

Территория Татарстана характеризуется умеренно-континентальным типом климата средних широт, с теплым летом и умеренно-холодной зимой. По причине удаленности от морских и океанических течений, ослабления

западного переноса воздушных масс и усиления континентальности климата на территории Республики Татарстан наблюдается удлинение зимы, сокращение продолжительности периодов межсезонья и увеличение количества дней с заморозками в конце весны и начале осени [Сидоров и др., 2013].

Вода р. Казанки характеризуется нейтральной реакцией среды, повышенной жесткостью, тип воды – сульфатный, из катионов преобладает кальций. Вклад в повышение фонового уровня вносят сульфаты природного происхождения, источником которых служат минерализованные сульфатно-кальциевые подземные воды бассейна [Шагидуллин и др., 2017].

Исследования проводились в устьевой области р. Казанки, находящейся в черте г. Казани. Отбор проб выполнялся ежемесячно с июня по август 2021 года на пяти станциях в верхней части устьевой области реки на участке протяженностью примерно 3 км (рис. 1).

Пробы воды для микробиологического анализа отбирались с глубины 10 см в стерильные стеклянные бутылки объемом 1000 мл [ГОСТ 31942-2012]. Для подсчета общего количества бактерий, когда не нужно было проводить микробиологический посев на питательные среды, в емкости с пробами вносили формалин. Эколого-трофические группы микроорганизмов определяли путем посева проб воды на селективные питательные среды.

Общее количество бактериопланктона определяли методом прямого счета клеток на мембранных фильтрах Владипор (Россия) с размером пор 0,2 мкм, окрашенных толуидиновым синим, с применением масляной иммерсии при увеличении микроскопа 1350x [Кузнецов, Дубинина, 1989; Morozova et al., 2012].

Считали количество палочковидных и кокковых форм, средний объем клеток и на основе этих данных рассчитывали биомассу [Кузнецов, Дубинина, 1989].

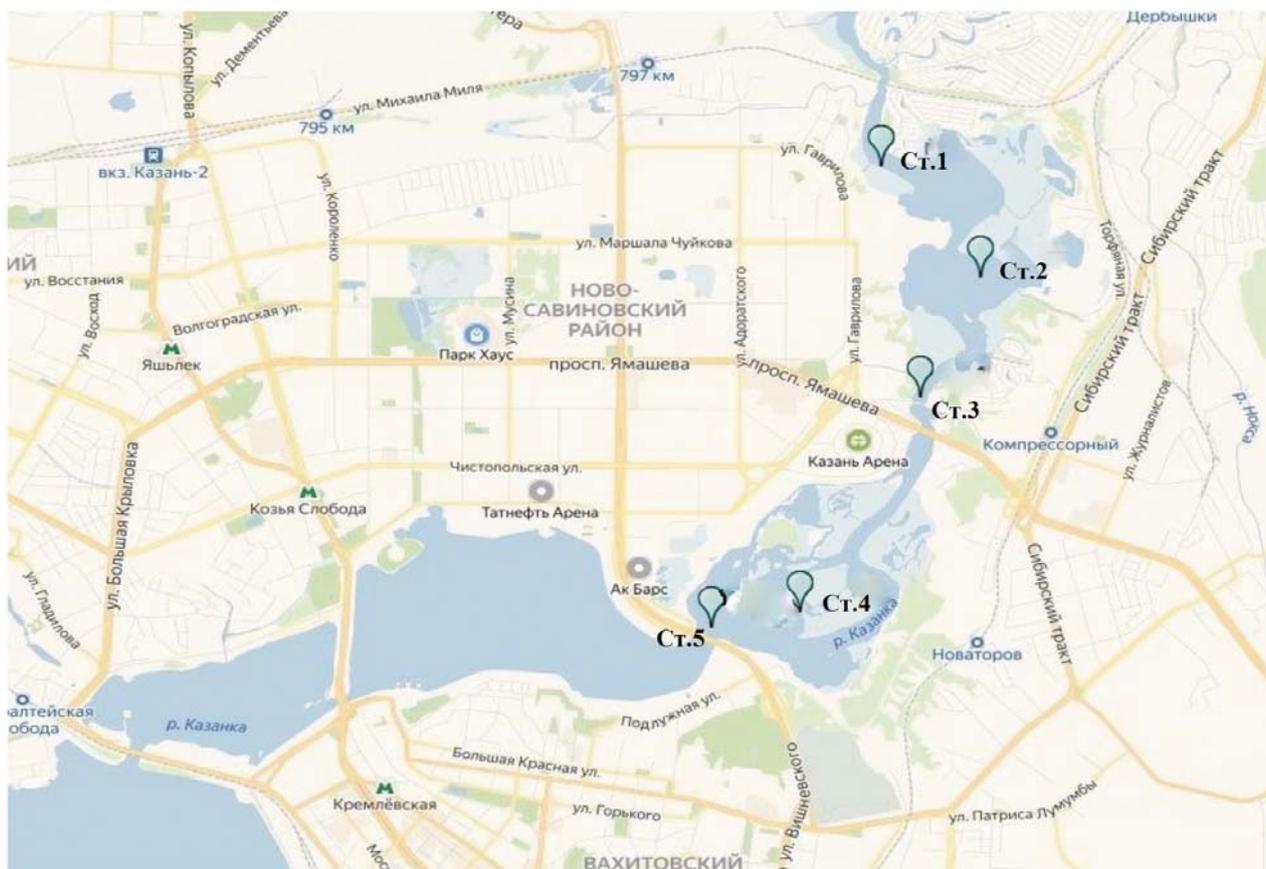


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб (1–5) в устьевой области р. Казанки: Ст. 1 – в районе выпуска ливневых вод с ул. Гаврилова, Ст. 2 – озеровидное расширение реки, Ст. 3 – вблизи третьей транспортной дамбы, Ст. 4 – среди островков в районе урочища Русско-Немецкая Швейцария, Ст. 5 – у моста Миллениум

Fig 1. The layout of sampling stations (1–5) in the Kazanka River mouth: St. 1 – in the area of the discharge of stormwater from Gavrilova St., St. 2 – lake-like expansion of the river, St. 3 – near the third transport dam, St. 4 – among the islands in the area of the 'Russian-German Switzerland' tract, St. 5 – near the Millennium Bridge

Определяли общую численность бактерий, соотношение общей численности бактерий и количества сапрофитных бактерий, численность сапрофитных, олиготрофных, денитрифицирующих и нитрифицирующих бактерий, индекс трофности как соотношение количества олиготрофных и сапрофитных бактерий.

Для определения олиготрофных бактерий использовали среду Горбенко, для учета сапрофитных бактерий – среду МПА [Кузнецов, Дубинина, 1989].

Класс качества воды определяли согласно классификатору качества вод Росгидромета [РД 52.24.309-2016].

Для выявления нитрифицирующих бактерий использовали жидкую среду Виноградского [Колешко, 1981]. По мере роста культур проводили химические реакции с использованием реактива Грисса на образование аммиака и азотистой кислоты. Для определения денитрифицирующих бактерий использовали среду Гильтая, рН 7. Устанавливали рН по индикатору бромтимоловому синему [Кузнецов, Дубинина, 1989]. В процессе роста денитрифицирующих бактерий происходило восстановление нитратов и образование азота. О наличии денитрифицирующих бактерий судили по окрашиванию среды в синий цвет в результате подщелачивания и образованию пузырьков газа и пленки на поверхности среды.

Количественное определение нитрифицирующих и денитрифицирующих бактерий про-

водили с помощью таблицы Мак-Креди [Колешко, 1981].

Практические методы, используемые в работе, применяются при проведении микробиологических исследований также за рубежом [Bertoni et al., 2008; Naque et al., 2019].

Микробиологические исследования проб делали в трех повторностях. Посев на питательные среды проводили из двух соседних разведений. Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Statistica 6.0.

Результаты и обсуждение

За период исследования летом 2021 года установлено, что общая численность бактериопланктона либо практически не изменялась, либо постепенно увеличивалась к августу (рис. 2).

Численность бактериопланктона была высокой в пробах воды со станций 1 и 2. Вода, согласно классификатору Росгидромета, оценивалась как «загрязненная» (III класс качества) в течение всего лета. На станциях, расположенных ниже по течению, вода по общей численности бактериопланктона оценивалась в начале лета как «слабозагрязненная» (II класс качества), но к концу лета количество бактериопланктона постепенно увеличивалось. Вода характеризовалась уже как «загрязненная» (III класс качества).

В августе, когда стоит жаркая погода, вода хорошо прогревается, наблюдается интенсивное цветение воды, повышается концентрация

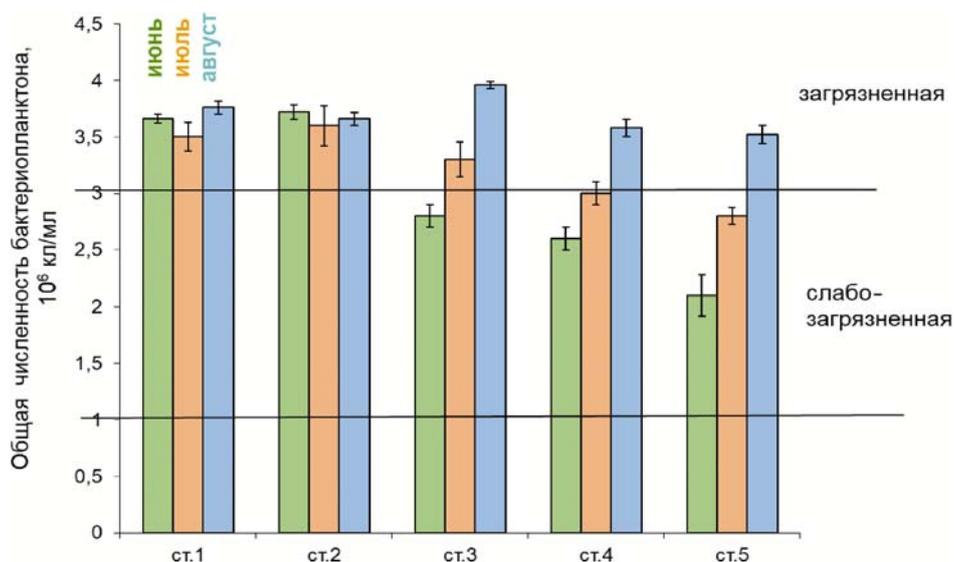


Рис. 2. Качество воды устьевой области р. Казанки по общей численности бактериопланктона

Fig. 2. Water quality in the Kazanka River mouth region by the bacterioplankton total number

питательных веществ, и все это способствует увеличению численности бактериопланктона – важного показателя загрязненности воды. Как правило, в летние месяцы численность бактериопланктона в водных объектах максимальна. Повышенная летняя температура часто оказывается фактором окружающей среды, наиболее влияющим на сезонную численность бактерий [Schultz et al., 2003; Yu et al., 2019].

Вода изучаемого участка реки по общей численности бактериопланктона оценивалась как «слабозагрязненная» – «загрязненная» (II-III класс качества).

Следует отметить, что численность бактериопланктона в устьевой части р. Казанки в 2021 г. в течение всего периода исследований была выше, чем в 2020 г., когда вода по данному показателю характеризовалась как «слабозагрязненная» (II класс качества) [Морозова и др., 2021]. Это небольшое снижение качества воды может быть связано с более жаркой погодой по сравнению с аналогичным периодом 2020 г.: летом 2020 г. средняя температура воздуха была 22 °С, а летом 2021 г. – 25 °С.

Известно, что численность и продуктивность бактериопланктона увеличивается в более жаркие летние периоды в связи с повышением температуры воды, эвтрофикацией и загрязнением водоемов. Потепление оказывает сильное влияние на микробные сообщества водных экосистем [Gu et al., 2020; Abirami et al., 2021]. Так, значительное увеличение численности, биомассы и продукции бактериопланктона с начала 1990-х годов в Горь-

ковском водохранилище связывают в первую очередь с повышением средней летней температуры [Korylov et al., 2020].

Обнаружена отрицательная корреляционная зависимость между температурой воды и численностью олиготрофных бактерий ($r = -0,69$; $p < 0,01$). Олиготрофные бактерии предпочитают водоемы с низким содержанием питательных веществ. При хорошем прогреве воды усиливаются процессы цветения, в частности цианобактерий, соответственно, повышается содержание в воде органического вещества [Абрамова, Токинова, 2023].

Отсутствие корреляции между температурой воды и воздуха и различными эколого-трофическими группами вполне закономерно, так как на развитие микробных сообществ может оказывать влияние множество других факторов, таких как концентрации биогенных элементов, продукция фитопланктона и др.

Возрастание биомассы бактериопланктона определялось увеличением его численности (рис. 3). На тех станциях, где общая численность бактериопланктона оставалась без изменений, биомасса также не менялась. Там, где общая численность бактериопланктона возрастала, показатели биомассы увеличивались. Значения биомассы бактериопланктона в среднем также были немного выше, чем в 2020 году [Морозова и др., 2021].

По количеству сапрофитов вода характеризовалась как «слабозагрязненная» и «загрязненная» (II-III класс качества) в июне и в августе, только в июле она оценивалась

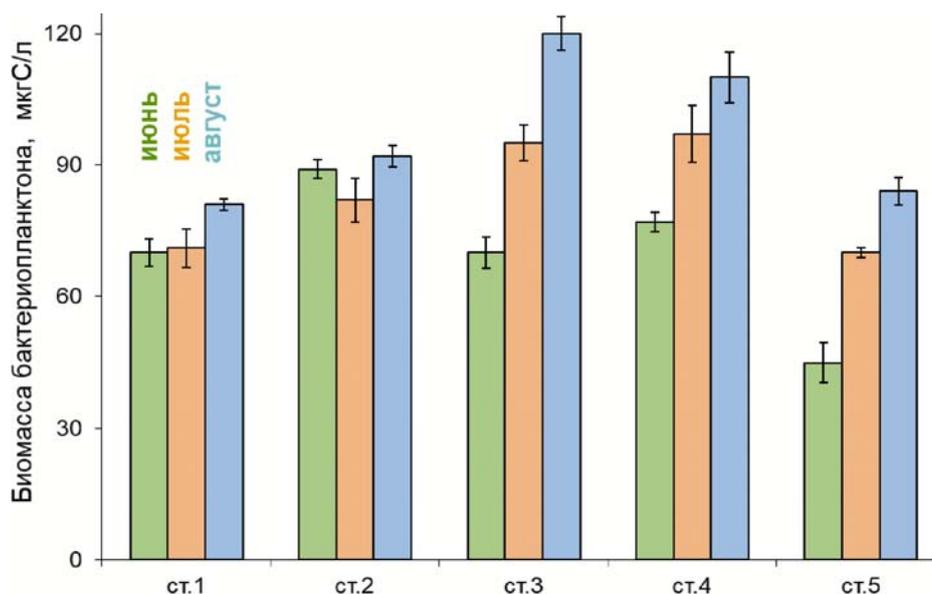


Рис. 3. Биомасса бактериопланктона устьевой области р. Казанки

Fig. 3. Biomass of bacterioplankton in the mouth region of the Kazanka River

как «условно чистая» и «слабозагрязненная» (I-II класс качества) (рис. 4).

По соотношению общего количества бактериопланктона и сапрофитных бактерий воду в течение всего периода наблюдений можно оценить как «слабозагрязненную» и «загрязненную» (II-III класс качества). Следует отметить, что в июле на станциях 4 и 5 качество воды было более высоким по сравнению с другими станциями (рис. 5).

То есть по всем микробиологическим показателям вода соответствовала уровням «слабозагрязненная» и «загрязненная» (II и III классы качества) согласно классификатору Росгидромета.

В июне отмечался заметный пик численности сапрофитных и олиготрофных бактерий. Их высокие значения были связаны с началом отмирания весенних форм фитопланктона после цветения, увеличением поступления аллохтонных веществ и микроорганизмов с паводком и по-

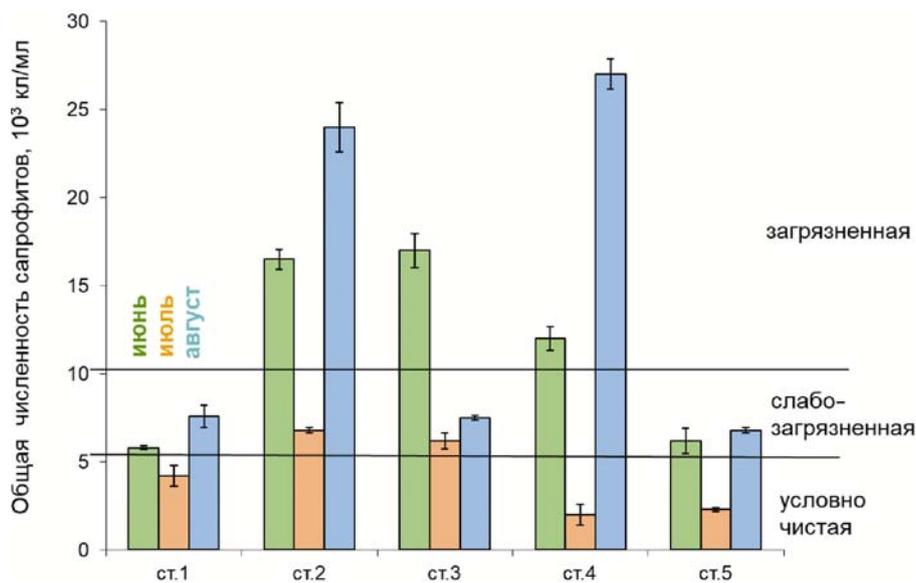


Рис. 4. Качество воды устьевой области р. Казанки по численности сапрофитов
 Fig. 4. Water quality in the Kazanka River mouth region by the saprophytes number

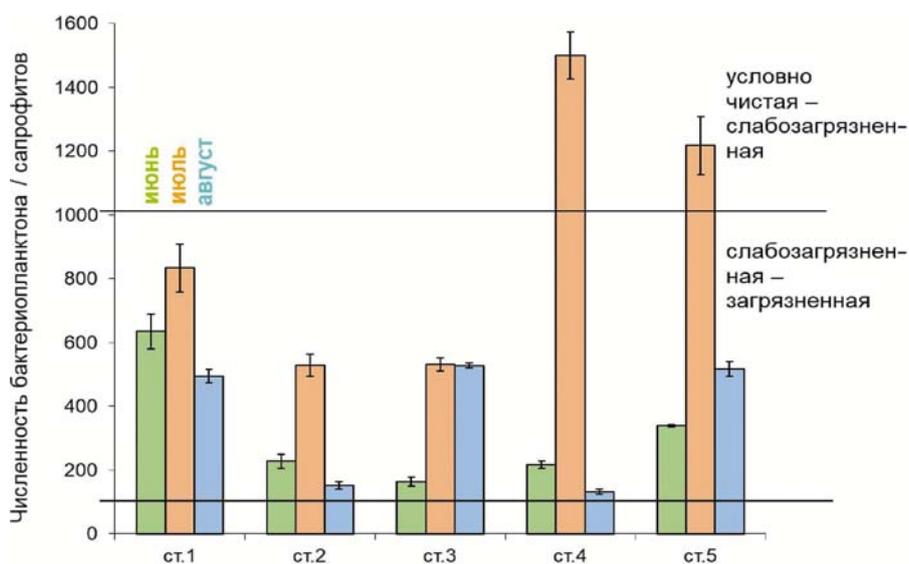


Рис. 5. Качество воды устьевой области р. Казанки по соотношению общей численности бактериопланктона и сапрофитов
 Fig. 5. Water quality in the Kazanka River mouth region by the ratio of bacterioplankton total number to saprophytes number

вышенной активностью микробных сообществ, участвующих в процессе самоочищения. Тогда же при высокой численности сапрофитов и олиготрофов наблюдались высокие значения индексов трофности (табл. 1; рис. 4), что говорит о способности водного объекта к самоочищению, о сбалансированности бактериальных процессов минерализации органического вещества.

В июле происходило резкое снижение численности олиготрофных бактерий, количество сапрофитных также уменьшалось. В июле и в большей степени в августе индекс трофности

падал до значений ниже единицы, что свидетельствует о загрязнении экосистемы водного объекта легкоминерализуемым органическим веществом [Романенко, Кузнецов, 1974].

Численность денитрифицирующих бактерий в гидрозкосистеме устьевой области р. Казанки была высокой только в начале лета, затем снижалась на 1-2 порядка, а численность нитрифицирующих – напротив, оставалась высокой все лето, и в течение всего периода наблюдений нитрифицирующие бактерии численно преобладали над денитрифицирующими (табл. 2).

Таблица 1. Численность олиготрофных бактерий, индекс трофности в устьевой области р. Казанки

Table 1. Oligotrophic bacteria number, trophic index in water samples from the Kazanka River mouth

Месяц Month	Ст. 1 St. 1	Ст. 2 St. 2	Ст. 3 St. 3	Ст. 4 St. 4	Ст. 5 St. 5
Олиготрофные бактерии, тыс. кл/мл Oligotrophic bacteria, thousands of cells/ml					
Июнь June	59,04 ± 1,17	98,1 ± 5,22	92 ± 1,76	94,2 ± 0,83	81,04 ± 2,70
Июль July	3,51 ± 0,20	6,31 ± 0,08	4 ± 0,31	2 ± 0,2	2,14 ± 0,09
Август August	4,02 ± 0,04	2,44 ± 0,01	0,94 ± 0,03	1,92 ± 0,05	1,64 ± 0,04
Индекс трофности Trophic index					
Июнь June	10,17 ± 0,22	5,91 ± 0,12	5,41 ± 0,23	7,83 ± 0,66	13,06 ± 1,2
Июль July	1,09 ± 0,12	0,92 ± 0,03	0,8 ± 0,02	1,21 ± 0,07	0,87 ± 0,01
Август August	0,52 ± 0,01	0,1 ± 0,02	0,12 ± 0,00	0,07 ± 0,00	0,23 ± 0,04

Таблица 2. Численность планктонных микроорганизмов цикла азота в устьевой области р. Казанки

Table 2. The number of planktonic microorganisms of the nitrogen cycle in the Kazanka River mouth

Месяц Month	Ст. 1 St. 1	Ст. 2 St. 2	Ст. 3 St. 3	Ст. 4 St. 4	Ст. 5 St. 5
Денитрифицирующие бактерии*, тыс. кл/мл Denitrifying bacteria*, thousands of cells/ml					
Июнь June	2,50	0,60	7,00	0,60	1,10
Июль July	0,25	0,02	0,06	0,02	0,50
Август August	0,25	0,60	0,02	0,25	0,60
Нитрифицирующие бактерии*, тыс. кл/мл Nitrifying bacteria*, thousands of cells/ml					
Июнь June	4,00	4,00	4,50	4,50	2,50
Июль July	2,50	2,50	0,60	0,60	2,50
Август August	2,50	1,30	2,50	2,50	2,50

Примечание. *Наиболее вероятное число микроорганизмов.

Note. *The most probable number of microorganisms.

Высокая численность нитрифицирующих бактерий в воде свидетельствует о насыщенности воды кислородом, а также окислении значительного количества аммония, поступающего как из водной среды, так и из донных отложений. При низкой численности нитрифицирующих бактерий аммоний накапливается в природной воде [Сахно, Трифонова, 2007; Голованева, Ступникова, 2020]. Очень низкие количества денитрифицирующих бактерий в пробах воды на некоторых станциях в июле и августе служат индикаторами низкой активности процессов денитрификации, что может привести к нарушению процессов минерализации азота и к накоплению нитратов в воде.

Заключение

По индикаторным показателям общей численности бактериопланктона и сапрофитных бактерий, а также по соотношению общего количества бактерий и сапрофитов вода исследуемого участка реки в течение всего лета характеризовалась как «слабозагрязненная» – «загрязненная», II-III класса качества согласно классификации качества воды Росгидромета [РД 52.24.309-2016].

Численность бактериопланктона в 2021 году, достаточно высокая в течение всего летнего периода, на некоторых станциях постепенно увеличивалась к августу, что связано с высокими летними температурами в августе, цветением фитопланктона, длительной летней рекреационной нагрузкой (купальный сезон и т. д.).

Количество сапрофитных и олиготрофных бактерий было высоким в начале лета, после отмирания весенних форм фитопланктона. При этом количество олиготрофных бактерий значительно превышало число сапрофитных, что свидетельствует о высокой активности микробных сообществ, участвующих в процессе самоочищения гидроэкосистемы. К концу лета уже сапрофитные бактерии численно преобладали над олиготрофными, что указывало на увеличение концентрации легкоминерализуемого органического вещества.

Высокая численность бактерий цикла азота свидетельствовала об активной минерализации аммонийного азота. Численность нитрифицирующих бактерий превышала количество денитрифицирующих в течение всего периода исследований, что свидетельствует о преобладании процессов нитрификации, а также о наличии достаточных концентраций растворенного кислорода, нитритного и нитратного азота в водах устьевой области реки. В то же время на некоторых станциях наблюдаются признаки

незавершенности минерализации азота, что может привести к накоплению нитратов в воде и ухудшению ее качества.

Дальнейшие наблюдения за особенностями развития бактериопланктона устьевой области реки Казанки помогут установить факторы, влияющие на изменения численности микробных сообществ, определить активность водных микроорганизмов в круговороте биогенных элементов и процессе самоочищения.

Литература

- Абрамова К. И., Токинова Р. П. Межгодовая динамика летнего фитопланктона в устьевой области реки Казанки (г. Казань) // Самарская Лука: проблемы локальной и глобальной экологии. 2020. Т. 29, № 3. С. 89–94. doi: 10.24411/2073-1035-2020-10336
- Абрамова К. И., Токинова Р. П., Водунов Н. Р., Шагидуллин Р. Р., Шурмина Н. В. Анализ корреляционной связи между развитием фитопланктона и кислородным режимом устьевого участка реки // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 5. С. 20–31. doi: 10.17076/esc1391
- Абрамова К. И., Токинова Р. П. Пространственное распределение цианобактерий в фитопланктоне реки Казанка // Российский журнал прикладной экологии. 2023. № 1. С. 21–27. doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.21.27
- ГОСТ 31942-2012. Вода. Отбор проб для микробиологического анализа. М.: Стандартинформ, 2013. 28 с.
- Голованева А. Е., Ступникова Н. А. Микробиологическая трансформация азота в озере Халактыском (Камчатский край) // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 6(96). С. 38–44. doi: 10.23670/IRJ.2020.96.6.045
- Колешко О. И. Экология микроорганизмов почвы: Лабораторный практикум. Минск: Высш. шк., 1981. 176 с.
- Копылов А. И., Косолапов Д. Б. Микробная «петля» в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем. Ижевск: КнигоГрад, 2011. 332 с.
- Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
- Морозова О. В., Токинова Р. П., Шурмина Н. В., Водунов Н. Р. Оценка экологического состояния устьевой области р. Казанка по количественным показателям микробных сообществ // Российский журнал прикладной экологии. 2021. № 2. С. 41–46. doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.41.46
- РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши.
- Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных вод. Лабораторное руководство. М.: Наука, 1974. 194 с.
- Сахно О. Н., Трифонова Т. А. Экология микроорганизмов: учеб. пособие. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. 64 с.
- Сидоров В. П., Рубцов В. А., Шабалина С. А., Булатова Г. Н. Природно-рекреационный потенциал

Республики Татарстан // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2013. № 3. С. 152–161.

Шагидуллин Р. Р., Латыпова В. З., Никитин О. В., Яковлева О. Г. Оценка техногенной нагрузки сточных вод предприятий на Куйбышевское водохранилище // Георесурсы. 2011. № 2(38). С. 24–27.

Шагидуллин Р. Р., Иванов Д. В., Горшкова А. Т., Урбанова О. Н., Мустафина Л. К., Шурмина Н. В., Абдуллина Ф. М., Богданова О. А., Токинова Р. П., Абрамова К. И., Валиев В. С., Зиганшин И. И., Шамаев Д. Е., Хасанов Р. Р. Качество воды в реке Казанка: теоремы и аксиомы // Чистая вода. Казань: Мат-лы докл. VIII Специализ. выставки и конгр. (Казань, 30 нояб. – 1 дек. 2017 г.). Казань: Новое знание, 2017. С. 258–262.

Abirami B., Radhakrishnan M., Kumaran S., Wilson A. Impacts of global warming on marine microbial communities // *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 791. P. 147905. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147905

Adamovich B. V., Medvinsky A. B., Nikitina L. V., Radchikova N. P., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Veres Yu. K., Chakraborty A., Rusakov A. V., Nurieva N. I., Zhukova T. V. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring // *Ecological Indicators.* 2019. Vol. 97. P. 120–129. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.09.049.

Bertoni R., Callieri C., Balseiro E., Modenutti B. Susceptibility of bacterioplankton to nutrient enrichment of oligotrophic and ultraoligotrophic lake waters // *J. Limnol.* 2008. Vol. 67, no. 2. P. 120–127. doi: 10.4081/jlimnol.2008.120

Gu B., Lee C., Ma X., Tan Y., Liu H., Xia X. Effect of warming on growth, grazing, and community composition of free-living bacterioplankton in subtropical coastal waters during winter and summer // *Front. Microbiol.* 2020. Vol. 11. P. 534404. doi: 10.3389/fmicb.2020.534404

Haque M. A., Jewel M. A. S., Sultana M. P. Assessment of physicochemical and bacteriological parameters in surface water of Padma River, Bangladesh // *Appl. Water Sci.* 2019. Vol. 9. P. 1–8. doi: 10.1007/s13201-018-0885-5

Kopylov A. I., Kosolapov D. B., Mikryakova I. S. Long-term dynamics of heterotrophic bacterioplankton in a large eutrophic reservoir // *Inland Water Biology.* 2020. Vol. 13. P. 585–591. doi: 10.1134/S1995082920040045

Morozova O. V., Ratushnyak A. A., Trushin M. V. Participation of planktonic and benthic bacteria in the polyphosphate-accumulating process in mesocosms contaminated with phosphate and nitrate // *World Applied Science Journal.* 2012. Vol. 19, no. 1. P. 12–19. doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.01.64182.

Schultz Jr G. E., White III E. D., Ducklow H. W. Bacterioplankton dynamics in the York River estuary: primary influence of temperature and freshwater inputs // *Aquat. Microb. Ecol.* 2003. Vol. 30, no. 2. P. 135–148. doi: 10.3354/ame030135

Yu S., He R., Song A., Huang Y., Jin Z., Liang Y., Li Q., Wang X., Muller W. E. G., Cao J. Spatial and temporal dynamics of bacterioplankton community composition in a subtropical dammed karst river of southwestern China // *Microbiology Open.* 2019. Vol. 8, no. 9. P. e00849. doi: 10.1002/mbo3.849

References

Abirami B., Radhakrishnan M., Kumaran S., Wilson A. Impacts of global warming on marine microbial communities. *Sci. Total Environ.* 2021;791:147905. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147905

Abramova K. I., Tokinova R. P. Interannual dynamics of summer phytoplankton in the mouth region of the Kazanka River (Kazan). *Samarskaya Luka: problemy lokal'noi i global'noi ekologii = Samarsky Luka: Problems of Regional and Global Ecology.* 2020;29(3): 89–94. doi: 10.24411/2073-1035-2020-10336 (In Russ.)

Abramova K. I., Tokinova R. P. Spatial distribution of cyanobacteria in the phytoplankton of the Kazanka River. *Russian Journal of Applied Ecology.* 2023;1:21–27. doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.21.27 (In Russ.)

Abramova K. I., Tokinova R. P., Vodunon N. R., Shagidullin R. R., Shurmina N. V. Analysis of correlation between phytoplankton and oxygen regime in river mouth area. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2021;5:21–30. doi: 10.17076/eco1391 (In Russ.)

Adamovich B. V., Medvinsky A. B., Nikitina L. V., Radchikova N. P., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Veres Yu. K., Chakraborty A., Rusakov A. V., Nurieva N. I., Zhukova T. V. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring. *Ecological Indicators.* 2019;97:120–129. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.09.049

Bertoni R., Callieri C., Balseiro E., Modenutti B. Susceptibility of bacterioplankton to nutrient enrichment of oligotrophic and ultraoligotrophic lake waters. *J. Limnol.* 2008;67(2):120–127. doi: 10.4081/jlimnol.2008.120

Golovaneva A. E., Stupnikova N. A. Microbiological transformation of nitrogen in Lake Halaktytsky (Kamchatka Krai). *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal.* 2020;6(96):38–44. doi: 10.23670/IRJ.2020.96.6.045 (In Russ.)

GOST 31942-2012. Water. Sampling for microbiological analysis. Moscow: Standartinform; 2013. 28 p. (In Russ.)

Gu B., Lee C., Ma X., Tan Y., Liu H., Xia X. Effect of warming on growth, grazing, and community composition of free-living bacterioplankton in subtropical coastal waters during winter and summer. *Front. Microbiol.* 2020;11:534404. doi: 10.3389/fmicb.2020.534404

Haque M. A., Jewel M. A. S., Sultana M. P. Assessment of physicochemical and bacteriological parameters in surface water of Padma River, Bangladesh. *Appl. Water Sci.* 2019;9:1–8. doi: 10.1007/s13201-018-0885-5

Koleshko O. I. Ecology of microorganisms of soil: Laboratory practice. Minsk: Vyssh. shk.; 1981. 175 p. (In Russ.)

Kopylov A. I., Kosolapov D. B. The microbial loop in the planktonic communities of marine and freshwater ecosystems. Izhevsk: KnigoGrad; 2011. 332 p. (In Russ.)

Kopylov A. I., Kosolapov D. B., Mikryakova I. S. Long-term dynamics of heterotrophic bacterioplankton in a large eutrophic reservoir. *Inland Water Biology.* 2020;13:585–591. doi: 10.1134/S1995082920040045

Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. Methods for studying water microorganisms. Moscow: Nauka; 1989. 288 p. (In Russ.)

Morozova O. V., Ratushnyak A. A., Trushin M. V. Participation of planktonic and benthic bacteria in the polyphosphate-accumulating process in mesocosms contaminated with phosphate and nitrate. *World Applied Science Journal*. 2012;19(1):12–19. doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.01.64182

Morozova O. V., Tokinova R. P., Shurmina N. V., Vodunon N. R. Ecological assessment of the Kazanka River mouth area by quantitative indicators of microbial communities. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2021;2:41–46. doi: 10.24852/2411-7374.2021.2.41.46 (In Russ.)

RD 52.24.309-2016. Organization and conduct of regime observations of the state and pollution of surface land waters. (In Russ.)

Romanenko V. I., Kuznetsov S. I. Ecology of microorganisms of fresh waters. A laboratory manual. Moscow: Nauka; 1974. 194 p. (In Russ.)

Sakhno O. N., Trifonova T. A. Ecology of microorganisms: A textbook. Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta; 2007. 64 p. (In Russ.)

Schultz Jr G. E., White III E. D., Ducklow H. W. Bacterioplankton dynamics in the York River estuary: primary influence of temperature and freshwater inputs.

Aquat. Microb. Ecol. 2003;30(2):135–148. doi: 10.3354/ame030135

Shagidullin R. R., Ivanov D. V., Gorshkova A. T., Urbanova O. N., Mustafina L. K., Shurmina N. V., Abdullina F. M., Bogdanova O. A., Tokinova R. P., Abramova K. I., Valiev V. S., Ziganshin I. I., Shamaev D. E., Khasanov R. R. Water quality in the Kazanka River: theorems and axioms. *Chistaya voda. Kazan': Sb. trudov VIII Specializ. vystavki i Kongressa = Pure water. Kazan: Abstracts of VIII Conference and Congress (Kazan, 30 Nov. – 1 Dec. 2017)*. Kazan': Novoe znanie; 2017. P. 258–262. (In Russ.)

Shagidullin R. R., Latypova V. Z., Nikitin O. V., Yakovleva O. G. The evaluation of technogenic load of enterprises wastewaters on Kuibyshev reservoir. *Georesursy = Georesources*. 2011;2(38):24–27. (In Russ.)

Sidorov V. P., Rubtsov V. A., Shabalina S. A., Bulatova G. N. Natural-recreational potential of Tatarstan. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle = Bulletin of Udmurt University. Ser. Biology. Earth Sciences*. 2013;3:152–161. (In Russ.)

Yu S., He R., Song A., Huang Y., Jin Z., Liang Y., Li Q., Wang X., Muller W. E. G., Cao J. Spatial and temporal dynamics of bacterioplankton community composition in a subtropical dammed karst river of southwestern China. *Microbiology Open*. 2019;8(9):e00849. doi: 10.1002/mbo3.849

Поступила в редакцию / received: 20.03.2023; принята к публикации / accepted: 31.05.2023.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Морозова Ольга Владимировна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник
лаборатории гидробиологии

e-mail: oollgaa@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Morozova, Olga

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

УДК 504.054

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ *CHLORELLA* ДЛЯ СНИЖЕНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОЗЕРНО-РЕЧНУЮ СИСТЕМУ КАРЕЛИИ

Г. А. Щеглов

Институт проблем промышленной экологии Севера
Федерального исследовательского центра Кольский научный центр РАН
(Академгородок, 14а, Апатиты, Россия, 184209)

Неорганические соединения азота в сточных водах представляют собой серьезную проблему для водных экосистем и различных промышленных предприятий, включая горнодобывающие. Эти соединения могут попадать в сточные воды карьеров при использовании взрывчатых веществ, содержащих нитрат аммония, что приводит к нанесению ущерба окружающей среде, загрязнению водоемов, заболеваниям людей и штрафам для компаний, превышающих установленные законом пределы загрязнения. Биологические методы широко используются для удаления азота из сточных вод, но их эффективность ограничена в северных регионах России из-за неблагоприятных климатических условий, препятствующих росту организмов. Поэтому крайне важно разработать новые технологии удаления соединений азота из сточных вод. В статье представлено исследование способности водоросли рода *Chlorella*, выращенной на безазотной среде, утилизировать при различных температурных условиях соединения азота из сточных вод горнодобывающих производств на примере карьерных вод предприятия АО «Карельский окатыш». Для проведения экспериментов была подготовлена специальная среда культивирования без азота, на которой выращивалась водоросль перед посевом. Концентрация биомассы водоросли оценивалась колориметрическим методом, концентрация аммония и нитритов в воде определялась ионоселективным методом. В условиях эксперимента благодаря подготовке водоросли на новой среде достигнуто успешное культивирование водоросли на сточных водах, 94% удаление аммония и 96% удаление нитратов из сточных вод. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработки технологии очистки сточных вод от неорганического азота с помощью микроводорослей рода *Chlorella*.

Ключевые слова: азотсодержащие соединения; нитраты; аммоний; биологическая очистка; микроводоросли; биотехнологии; водные ресурсы

Для цитирования: Щеглов Г. А. Возможность использования *Chlorella* для снижения антропогенной нагрузки горного производства на озерно-речную систему Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 107–116. doi: 10.17076/lim1789

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы НИР FMEZ-2022-0010 122022400112-7 «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)».

G. A. Shcheglov. THE POSSIBILITY OF USING *CHLORELLA* ALGAE TO REDUCE THE MINING INDUSTRY LOAD ON A KARELIAN LAKE-RIVER SYSTEM

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)

Inorganic nitrogen compounds in wastewater are a serious problem for aquatic ecosystems and various industries, including mining. These compounds can enter the wastewater of quarries when explosives containing ammonium nitrate are used, resulting in environmental damage, water pollution, human illnesses and fines for companies that exceed binding pollution limits. Biological methods are widely used to remove nitrogen from wastewater, but their efficacy in northern regions of Russia is limited by unfavorable climatic conditions, which inhibit the growth of organisms. Therefore, it is crucial to develop new techniques to remove nitrogen compounds from wastewater. The aim of this study was to investigate the ability of *Chlorella* algae grown on nitrogen-free medium to recycle nitrogen compounds from mining wastewater, using Karelsky Okatysh JSC open pit water as an example. A special nitrogen-free culture medium was prepared for the experiments, on which the algae were grown before inoculation. The concentration of algal biomass was estimated by the colorimetric method, and the concentration of ammonium and nitrite in the water was estimated by the ion-selective method. As a result, a special algae culture medium without nitrogen sources was tested. Due to such conditioning of algae on the new medium the cultivation of algae in wastewater in the experiment was successful, providing 94% removal of ammonium and 96% removal of nitrates from wastewater. These results indicate the development of a technology for wastewater treatment to remove inorganic nitrogen using microalgae of the genus *Chlorella* has good prospects.

Keywords: nitrogen compounds; nitrates; ammonium; biological treatment; microalgae; biotechnology; water resources

For citation: Shcheglov G. A. The possibility of using *Chlorella* algae to reduce the mining industry load on a Karelian lake-river system. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 107–116. doi: 10.17076/lim1789

Funding. The research was carried out within the research theme FMEZ-2022-0010 122022400112-7 "Transformation of natural and anthropogenic systems under climate change in the Arctic zone of the Russian Federation (case study of the Murmansk Region)".

Введение

Водные ресурсы играют ключевую роль в поддержании жизни человека и экосистем. Они необходимы для питьевого водоснабжения, сельского хозяйства и промышленности. Загрязнение водных ресурсов является глобальной проблемой. Распространенными загрязнителями являются азотсодержащие соединения – аммиак, нитраты и нитриты. Они могут поступать в воду из различных источников, таких как промышленные стоки, сельскохозяйственные удобрения и канализационные системы. Это приводит к ухудшению качества воды и оказывает негативное влияние на водные биоресурсы и здоровье людей [Солнышкова, 2020]. Разработка систем очистки сточных вод от соединений азота имеет потенциал улучшить качество водных ресурсов и сделать их доступнее для использования в различных сферах. Это будет способствовать устойчивому развитию, улучшению экологической

ситуации и созданию более безопасной и здоровой окружающей среды для людей и животных [Иванова и др., 2021].

Одной из проблем является загрязнение сточных вод неорганическими соединениями азота на горнопромышленных предприятиях. Биогенный азот попадает в экосистемы как результат жизнедеятельности организмов и может быть поглощен растениями в процессе их роста и развития. Неорганический азот в отличие от биогенного образуется при неполном разложении взрывчатых веществ при взрывных работах на горных производствах. В соответствии с этим для применения биологических методов очистки необходимо подобрать такие организмы, которые будут справляться не только с биогенным, но и с неорганическим азотом. Еще одной особенностью горнопромышленных предприятий являются объемы водосброса, которые в разы превышают объемы водосброса мелких предприятий и коммунальных хозяйств.

С загрязнением вод азотом можно эффективно бороться биологическими методами. Наиболее распространенными из них являются:

1) «Искусственные болота» с сообществами микроорганизмов, сосудистых растений, поглощающих азот [Савичев, 2008; Солнышкова, Пашкевич, 2018; Иванова и др., 2021]. При этом у метода имеются свои недостатки: низкая эффективность в северном климате, вторичное загрязнение от отмерших частей растений, необходимость индивидуального подбора растений под конкретное производство.

2) «Активный ил» – сообщества микроорганизмов, преобразующие азот в процессе нитрификации и денитрификации [Мешенгиссер и др., 2006; Зубов и др., 2013; Дубовик, Маркевич, 2016]. Недостатками метода являются затраты на строительство биореакторов и эксплуатационные расходы, узкий температурный диапазон рабочих условий, необходимость утилизации избыточного активного ила.

3) Микроводоросли, поглощающие азот в прудах-отстойниках либо биореакторах. Так, в работе [Кирилина, 2013] установлена высокая эффективность удаления азота при совместном использовании микроводорослей и активного ила.

Микроводоросли, такие как водоросли рода *Chlorella*, *Scenedesmus* и другие, могут эффективно удалять азотистые соединения из сточных вод. Рядом исследований установлена принципиальная возможность использования рода *Chlorella* для очистки сточных вод от соединений азота [Bich et al., 1999; Widjaja et al., 2009; Wang et al., 2010, 2013; Chen et al., 2023].

Еще одним преимуществом микроводорослей является возможность их применения в различных целях. Например, микроводоросли как продуцент липидов могут использоваться для получения биотоплива [Widjaja et al., 2009], и это решает вопрос с последующей утилизацией образующейся биомассы водоросли и переходом на безотходное производство.

В ряде исследований установлена способность различных видов рода *Chlorella* поглощать соединения азота из воды [Кирилина, 2013; Солнышкова, 2020]. Согласно результатам исследования [Кирилина, 2013], при совместном применении водоросли рода *Chlorella* и сообществ активного ила эффективность очистки сточных вод от азота может достигать 100 %.

В перечисленных выше исследованиях шла речь об удалении биологического азота. Не менее важной задачей является удаление неорганического азота из сточных вод, в частности при горнодобыче. М. А. Солнышковой [2020] установлена возможность утилизиро-

вать аммонийный азот из стоков предприятий горнодобывающего комплекса даже в условиях низких температур путем подбора холодоустойчивых штаммов и разработки специальных сред культивирования. Однако при наличии результатов по успешному удалению азота из сточных вод на сегодняшний день не существует технологии их биологической очистки от соединений азота при низких температурах воды в условиях северного климата.

Таким образом, исследование потенциала водоросли хлореллы для снижения концентрации азотсодержащих соединений в воде является актуальным и может использоваться при разработке эффективных и устойчивых решений для контроля загрязнения водных ресурсов. В частности, для очистки техногенных вод предприятий горнопромышленного комплекса от азотсодержащих соединений и снижения антропогенной нагрузки предприятий на озерно-речные системы.

Цель исследования заключается в изучении способности водоросли *Chlorella* sp., выращенной на безазотной среде, утилизировать соединения неорганического азота из сточных вод горнодобывающих производств в различных температурных условиях.

Материалы и методы

Место отбора проб. Исследование проводилось на образцах воды, взятых с предприятия АО «Карельский окатыш», расположенного в городе Костомукша, Республика Карелия, на Северо-Западе России. Данное предприятие занимается добычей и переработкой железной руды, и доля его продукции составляет 20 % от всех железорудных окатышей в России. Предприятие оказывает техногенное воздействие на озерно-речные системы Карелии. Так, в качестве хвостохранилища и для оборотного водоснабжения комбината используется оз. Костомукшское, из которого с 1994 г. осуществляется регулируемый сброс воды в систему р. Кенти. Деятельность ГОКа привела к изменению химического состава воды в озерно-речной системе. Произошло увеличение концентрации NO_3^- , а также K^+ , SO_4^{2-} , Li, Ni [Лозовик, Галахина, 2017]. Азот в воде не выпадает в осадок, его невозможно удалить химическими и физическими методами. Для очистки азота применяются биологические методы, однако их использование в климатических условиях Карелии затруднено. Кроме того, азот, попадающий в сточные воды ГОКа, – неорганического происхождения, образуется при неполном разложении нитрат-аммония при взрывных работах.

На производстве нет эффективной системы очистки техногенных сточных вод от азотсодержащих соединений, поэтому требуется разработка технологий очистки сточных вод от неорганического азота.

Для исследования были отобраны образцы воды из отстойника карьера. Пробы отбирались после отстаивания взвеси в воде. Исходная концентрация аммония в пробах воды составляла 227 мг/л.

Подготовка маточной культуры. Исследование способности микроводорослей к снижению концентрации азота в воде проводилось с использованием одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* (Beijer, 1890). Для экспериментов была подготовлена специальная маточная культура микроводорослей, выращенная на 50% среде Тамия без источников азота в течение 7 дней. Из навесок элементов было подготовлено 5 растворов объемом 100 мл (табл. 1), которые смешивались в мерной колбе согласно пропорциям, указанным в таблице 1. Полученный раствор доводился дистиллированной водой до объема 1 дм³.

При проведении эксперимента в пробы воды объемом 200 мл добавлялось 10 мл маточной культуры микроводоросли. Внесение суспензии микроводоросли производилось непосредственно перед началом эксперимента после разбавления и подготовки проб воды. Все пробы находились в колбах с узким горлышком, которые закрывались алюминиевой фольгой в ходе эксперимента.

Методика определения концентрации биомассы. Концентрация биомассы микроводоросли определялась колориметрическим методом. Измерения оптической плотности проводились на колориметре модели КФК-2 с кюветой шириной 10 мм. Предварительно с использованием спектрофотометрического метода по ГОСТ 17.1.4.02-90 определялась

концентрация биомассы водоросли. На основе значений концентраций и оптических плотностей проб при длине волны 540 нм строился калибровочный график, по которому определялась концентрация биомассы микроводоросли. Уравнение калибровочного графика было следующим:

$$y = 0,4628x + 0,001; R^2 = 0,9999,$$

где y – оптическая плотность пробы в кювете 10 мм при длине волны 540 нм, x – концентрация биомассы водоросли в пробе, R^2 – коэффициент детерминации.

Метод определения концентрации азота.

Для определения концентрации аммония и нитратов в воде применялись ионселективные методы с использованием иономера Мультитест ИПЛ-112 и электрода сравнения ЭСр-10103/3.0. Концентрация аммония определялась по методике РД 52.24.394-95 с помощью электрода ЭЛИТ-051. Концентрация нитратов определялась по методике РД 52.24.367-95 с использованием электрода ЭЛИТ-021. Перед началом серии экспериментов электрод был откалиброван.

Ход и условия эксперимента. Эксперименты проводились с двумя вариантами проб воды:

X – пробы воды, отобранные на отстойнике карьера предприятия;

X/2 – пробы той же воды, разбавленные дистиллированной водой в пропорции 50/50.

Оба варианта концентрации дублировались для четырех вариантов условий культивирования. Таким образом, проведено 8 вариантов эксперимента с различными условиями культивирования и концентрацией загрязняющих веществ, все пробы были пронумерованы от 1 до 8 (табл. 2).

Таблица 1. Состав среды культивирования

Table 1. Composition of the cultivation medium

№ п/п No.	Компонент Component	Навеска, г/100 мл Suspension, g/100 ml	V раствора на 1 дм ³ среды, мл V solution per 1 dm ³ of medium, ml
1	MgSO ₄ *7H ₂ O	5	25
2	KH ₂ PO ₄	2,5	25
3	FeSO ₄ *7H ₂ O	0,3	1
4	Раствор А/ Solution А: - H ₂ BO ₃ - MnCl ₂ *4H ₂ O - ZnSO ₄ *5H ₂ O	0,286 0,181 0,0222	1
5	Раствор Б/ Solution Б: - MoO ₃	0,0018	1

Таблица. 2. Нумерация проб воды в соответствии с условиями эксперимента

Table 2. Numbering of the water samples according to the experimental conditions

Т °С	Степень разбавления Dilution level	
	X/2	X
1	1	5
7	2	6
17	3	7
26	4	8

В эксперименте проведено культивирование водорослей *C. vulgaris* при разных температурных условиях. Варианты экспериментов включали следующие условия:

1. Температура 1 °С (пробы 1 и 5) и 7 °С (пробы 2 и 6). В пробах воссоздавались экстремальные для вида условия. Пробы находились в холодильниках с заданной температурой без освещения и подачи воздуха. Цель состояла в выявлении способности водоросли выживать и поглощать азот при неблагоприятных условиях.

2. Комнатная температура (17 °С) с естественным освещением (пробы 3 и 7). В этих пробах водоросли выращивались при естественном освещении без аэрации при комнатной температуре. Такие условия использовались для сравнения результатов с работами других исследователей и для простоты воспроизведения.

3. Температура 26 °С с постоянным освещением и подачей воздуха (пробы 4 и 8). Водоросли культивировались при оптимальных для роста условиях, которые можно поддерживать в промышленных биореакторах. Пробы были освещены и подогревались с помощью светодиодной лампы LED-1088 Aquarium light, контроль температуры осуществлялся с помощью ртутного градусника, погруженного в пробу. Аэрация осуществлялась с помощью компрессора М-102 через пластиковые трубки со скоростью 2,5 л/мин.

Продолжительность экспериментов составила 15 суток. В течение всего периода ежедневно измерялись концентрация аммония, нитратов и биомасса водоросли. Все эксперименты были запущены в одно и то же время и проводились параллельно в одной повторности.

Статистическая обработка данных осуществлялась с применением стандартных алгоритмов анализа, включенных в пакет в MS Excel.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения концентрации биомассы водоросли *C. vulgaris* представлены на рис. 1 и 2.

В условиях азотного голодания у водорослей *C. vulgaris* наблюдается низкое содержание хлорофилла, что приводит к отсутствию

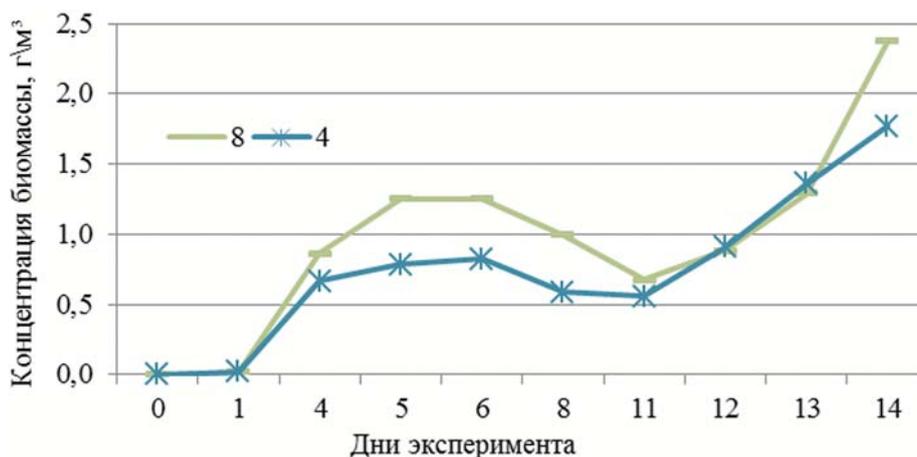


Рис. 1. Концентрация *C. vulgaris*, выращенной при азотном голодании после культивирования на сточных водах в оптимальных условиях.

Здесь и далее описание условий эксперимента для проб 8 и 4 см. в тексте

Fig. 1. Concentration of *C. vulgaris* grown under nitrogen starvation after culturing on waste water under optimum conditions.

Here and in Fig. 3, 4: Sample 8 – pit latrine water; Sample 4 – pit latrine water diluted 2-fold with distilled water; both samples were cultured at 26 °С with constant light and aeration

зеленой окраски в клетках. Эта особенность повлияла на оценку концентрации биомассы в начальный момент эксперимента (0-й день). В связи с этим для получения точной оценки концентрации биомассы водорослей в пробах воды было принято во внимание, что верная оценка становится возможной после 1-го дня эксперимента, когда водоросль начинает восстанавливать свою зеленую окраску и продолжает наращивать биомассу.

Результаты, представленные на рис. 2, показывают увеличение биомассы во всех пробах. Средняя концентрация биомассы после первого дня культивирования составила $0,013 \pm 0,004$ г/м³, к 14-му дню эксперимента среднее значение увеличилось до $0,2 \pm 0,01$ г/м³, прирост составил 53,8 %, что свидетельствует о жизнеспособности водоросли *C. vulgaris* в диапазоне температур от 1 до 17 °C без интенсивного наращивания биомассы. Кроме того, конечная концентрация биомассы оказалась выше в пробах с более высокой температурой. Таким образом, можно сделать вывод, что повышение температуры способствует увеличению конечной концентрации биомассы водоросли.

Отмечается, что не обнаружена зависимость скорости роста биомассы от концентрации

загрязнения. Например, при температурах 1 и 17 °C конечная концентрация биомассы микроводоросли оказалась выше в неразбавленных образцах воды, в то время как при температурах 7 и 26 °C биомасса оказалась выше в разбавленных пробах воды. Это может указывать на то, что влияние загрязнения на рост биомассы микроводоросли зависит от температуры и проявляется по-разному.

Результаты измерения концентрации аммония и нитратов в сточных водах представлены на рис. 3 и 4.

Из данных на рис. 3 видно, что при всех вариантах эксперимента наблюдается статистически значимое снижение концентрации аммония в пробах воды. Интенсивное снижение концентрации аммония происходит в первые 4 дня эксперимента, после чего концентрация выходит на плато и остается практически неизменной.

При температуре 1, 7 и 17 °C концентрация аммония не зависела от температуры. В пробах 1, 2 и 3 с исходной концентрацией аммония 13,4 мг/л она снижается до 6 мг/л после четырех дней эксперимента и остается на этом уровне до конца эксперимента. В пробах 5, 6 и 7 с исходной концентрацией аммония 5,7 мг/л также наблюдается значимое снижение концен-

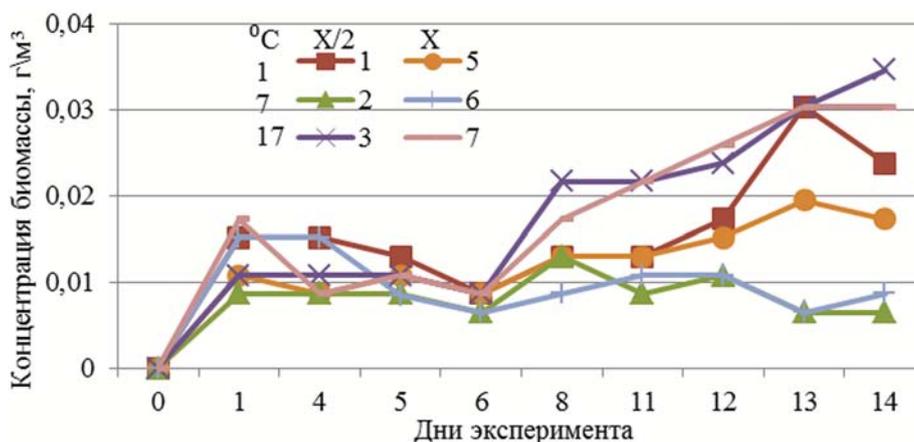


Рис. 2. Концентрация биомассы *C. vulgaris*, выращенной на азотном голодании после культивирования на сточных водах при различных температурных режимах.

Здесь и далее описание условий эксперимента для проб 1–3 и 5–7 см. в тексте

Fig. 2. Concentration of *C. vulgaris* biomass grown under nitrogen starvation after culturing on waste water at different temperature regimes.

Here and in Fig. 3, 4 chlorella culture samples: at a constant temperature of 17 °C, without aeration and variable illumination: 7 – samples of pit latrine water; 3 – samples of pit latrine water diluted 2-fold; chlorella culture samples at a constant temperature of 7 °C, without aeration and illumination: 6 – pit latrine water; 2 – samples of pit latrine water diluted 2-fold; chlorella culture samples at a constant temperature of 1 °C, without aeration and illumination: 5 – pit latrine water; 1 – samples of pit latrine water diluted 2-fold

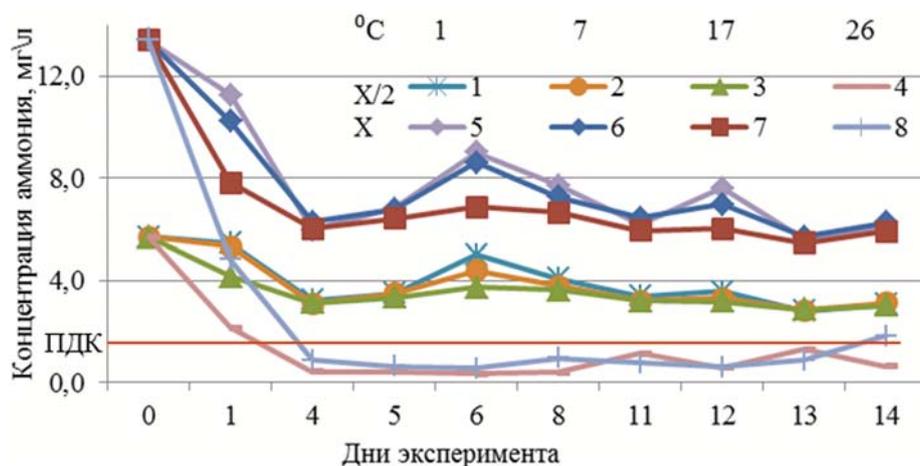


Рис. 3. Концентрация аммония в образцах воды при культивировании *C. vulgaris*, выращенной на азотном голодании

Fig. 3. Ammonium concentration in water samples during culturing *C. vulgaris* grown under nitrogen starvation

трации в первые четыре дня, после чего концентрация составляет около 3,1 мг/л и остается стабильной с незначительными колебаниями.

Более эффективное удаление аммония в воде наблюдается в пробах 4 и 8, которые культивировались при температуре 26 °С с аэрацией и освещением. В пробе 4 с исходной концентрацией аммония 5,7 мг/л она снижается до 0,4 мг/л после четырех дней эксперимента. В пробе 8 с исходной концентрацией аммония 13,4 мг/л наблюдается ее уменьшение до 0,9 мг/л. В обоих случаях содержание ионов аммония остается на стабильном уровне

с отклонением, не превышающим $\pm 0,9$ мг/л. Полученные концентрации аммония были ниже предельно допустимой концентрации (ПДК) по аммонии. Таким образом, в пробах 4 и 8 удалось снизить концентрацию аммония на 93 % за четыре дня эксперимента.

Из данных на рис. 4 следует, что во всех пробах зафиксировано снижение концентрации нитратов. Однако при культивировании при температурах 1, 7 и 17 °С утилизация азота была незначительной и неэффективной для очистки воды, независимо от исходной концентрации нитратов.

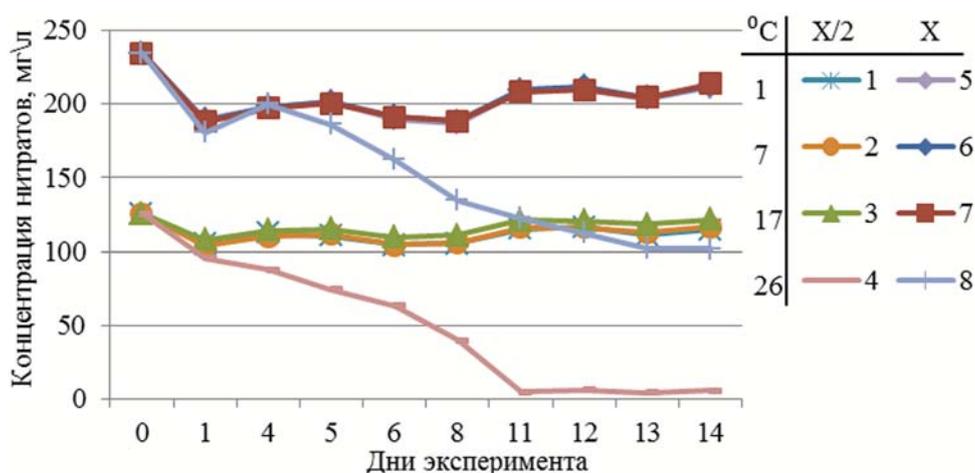


Рис. 4. Концентрация нитратов в образцах воды при культивировании *C. vulgaris*, выращенной на азотном голодании

Fig. 4. Nitrate concentration in water samples during culturing *C. vulgaris* grown under nitrogen starvation

Другая ситуация наблюдалась при культивировании при температуре 26 °С. В пробе 4 с исходным количеством нитратов 125,5 мг/л уровень ПДК был достигнут через 8 дней эксперимента. Затем содержание нитратов продолжало снижаться и к 11-му дню было на уровне $5 \pm 1,5$ мг/л. В пробе 8 с исходным содержанием нитратов 234,5 мг/л концентрация снизилась до 122,5 мг/л к 11-му дню эксперимента. В 14-й день эксперимента количество нитратов в пробе 8 снижалось до 101,5 мг/л.

В процентном соотношении из пробы 4 с исходной концентрацией 125,5 мг/л удалено 68 % нитратов за 8 дней и 96 % за 11 дней эксперимента. Из пробы 8 с исходным содержанием 234,5 мг/л удалено 48 % нитратов за 8 дней и 57 % за 14 дней эксперимента.

Предполагается, что при исходной концентрации нитратов в 234,5 мг/л достижение уровня ПДК должно наступить на 19-й день. Однако необходимо проверить данное предположение, так как при длительном культивировании может произойти насыщение водорослей азотом или достижение критической отметки биомассы водоросли, которое приведет к остановке снижения концентрации нитратов или даже к ее увеличению за счет вторичного загрязнения.

В предыдущих исследованиях способности водорослей к поглощению соединений азота из сточных вод [Щеглов, 2023] отмечено снижение концентрации аммония на 84–87 % за 3 дня при культивировании в температуре 26 °С с аэрацией и освещением. Однако существенного снижения при температурах 7 и 17 °С без аэрации и освещения не наблюдалось. Результаты текущего исследования показывают, что утилизация аммония водорослями при азотном голодании оказалась более эффективной и составила 93 % за 4 дня при температуре 26 °С с аэрацией и освещением. Кроме того, удалось достичь утилизации аммония с эффективностью 45–55 % при различных температурных режимах от 1 до 17 °С, что не было достигнуто при культивировании водорослей на среде Тамия.

Для дальнейших исследований следует изучить зависимость эффективности утилизации азотных соединений в сточных водах от объема вносимой культуры водорослей и определить оптимальный объем для различных концентраций загрязнителей. Это позволит повысить эффективность и ускорить процесс поглощения нитратов в воде.

Кроме того, благодаря выращиванию водорослей на безазотной среде удалось добиться степени утилизации нитратов от 48 % за 8 дней

до 96 % на 11-й день. В то время как результаты работы [Щеглов, 2023] показали, что хлорелла, выращенная на среде Тамия, не поглощает нитраты в значительной степени.

На основе проведенного сравнения можно сделать вывод, что выращивание хлореллы на среде без источников азота увеличивает ее эффективность в утилизации азотных соединений и расширяет диапазон температур, при которых наблюдается снижение концентрации не только аммония, но и нитратов. Однако следует проверить, какое влияние на эффективность очистки оказывает наличие азотных соединений, которые попадают в очищаемую воду при внесении суспензии, выращенной на среде Тамия. Существует вероятность, что повышение эффективности очистки суспензией водоросли, выращенной на азотном голодании, связано с тем, что такая суспензия не загрязняет воду азотом, содержащимся в классической среде Тамия. Для проверки этой гипотезы необходимо провести эксперименты по очистке воды не с помощью суспензии, а с использованием отделенной от среды биомассы водоросли. Отделение водоросли от среды можно достичь путем центрифугирования или высушивания.

В работе М. А. Солнышковой [2020] описана возможность использования *Chlorella kislери* (ВКПМ АИ-11 АRW 2015) для утилизации аммония из сточных вод горнодобывающего предприятия в Мурманской области. Согласно результатам этой работы, при температуре воды 3 °С наблюдалось снижение концентрации нитратов с 200 до 45 мг/л за 8 дней, а при температуре 19 °С – за 7 дней. В наших же результатах статистически значимого снижения концентрации нитратов при температуре 19 °С не отмечалось, в то время как при оптимальной для *C. vulgaris* температуре 26 °С концентрация нитратов снизилась с 125,5 мг/л до значения ПДК 40 мг/л за 8 дней, а за 11 дней – до 5 мг/л. В материалах М. А. Солнышковой [2020] показана более высокая, чем в нашей работе, эффективность очистки воды от нитратов в более широком диапазоне температур. Эти результаты обусловлены выбором холодоустойчивого вида водоросли *C. kislери*. Однако автором не представлены данные по изменению концентрации аммонийной формы азота, которая существенно снижалась при культивировании при 26 °С согласно оригинальным результатам. Поэтому необходимо повторить проведенные эксперименты с культурой, адаптированной к различным температурным условиям.

Заключение

В условиях 14-суточного эксперимента изучена способность культуры микроводоросли *C. vulgaris*, выращенной в условиях азотного голодания, наращивать биомассу, поглощая азот из карьерных вод предприятий горнопромышленного комплекса в различных температурных условиях. Установлено, что хлорелла, выращенная на среде Тамия без источников азота, успешно наращивает биомассу при постоянной температуре 26 °С, аэрации и освещении, а также снижает концентрацию нитратов в воде с эффективностью до 96 % за 11 дней. Эффективность очистки вод от ионов аммония в аналогичных условиях составила 93 % за 4 дня. При температуре 1, 7 и 17 °С без аэрации и с естественным освещением наблюдался неинтенсивный рост культуры, отсутствие поглощения нитратов, а также менее эффективное снижение концентрации аммония, чем при 26 °С.

Полученные результаты демонстрируют увеличение эффективности удаления азота из сточных вод при подготовке водоросли азотным голоданием и возможность применения подобной культуры для очистки сточных вод в регионах с благоприятным для водоросли климатом. В регионах с суровым климатом хлорелла, выращенная в условиях азотного голодания, способна снижать концентрацию аммония в естественных условиях и может быть использована для разработки систем биологической очистки сточных вод в биореакторах, поддерживающих необходимые для водоросли условия.

В будущих исследованиях необходимо выяснить оптимальный расход культуры для наиболее эффективной утилизации азота при различной степени загрязненности воды. Для этого следует сравнить степень очистки при добавлении различного объема культуры. Также необходимо продолжить изучение роли среды культивирования водоросли в утилизации азота, а именно провести эксперименты, в которых будет исключен вклад среды в изменение концентрации исследуемых соединений. Для этого целесообразно вносить при посеве концентрат суспензии после центрифугирования или после высушивания.

Перспективным является изучение способности микроводоросли *C. vulgaris* не только утилизировать азот, но и поглощать фосфор и тяжелые металлы из сточных вод. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности широкого использования микроводоросли *C. vulgaris* для снижения содержания аммонийного азота в сточных водах предприятий горнопромышленного комплекса.

Литература

Дубовик О. С., Маркевич Р. М. Совершенствование биотехнологий удаления азота и фосфора из городских сточных вод // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2016. № 4. 186 с.

Зубов М. Г., Бояренев С. Ф., Зубов Г. М., Куликов Н. И., Шрамов Ю. М., Литти Ю. В., Некрасова В. К., Ножевникова А. Н. Биотехнология очистки сточных вод с иммобилизацией активного ила и удалением азота // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 8. С. 72–75.

Иванова Л. А., Мязин В. А., Корнейкова М. В., Фокина Н. В., Евдокимова Г. А., Редькина В. В. Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от соединений азота. Апатиты: КНЦ РАН, 2021. 88 с. doi: 10.37614/978.5.91137.449.5

Кирилина Т. В. Оценка эффективности доочистки сточных вод с использованием одноклеточных и многоклеточных гидробионтов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 8(16). С. 200–203.

Лозовик П. А., Галахина Н. Е. Изменение химического состава воды системы р. Кенти в результате техногенного влияния // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 3. С. 21–35. doi: 10.17076/lim309

Мешенгиссер Ю. М., Щетинин А. И., Есин М. А. Удаление азота и фосфора активным илом // Коммунальное хозяйство городов. 2006. № 74. С. 36–45.

Савичев О. Г. Биологическая очистка сточных вод с использованием болотных биогеоценозов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 1. С. 69–74.

Солнышкова М. А. Снижение загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота в зоне воздействия горнодобывающих предприятий Мурманской области: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2020. 133 с.

Солнышкова М. А., Пашкевич М. А. Исследование эффективности биологической очистки воды от нитратов с помощью биоплато // Естественные и технические науки. 2018. № 5(119). С. 169–173.

Щеглов Г. А. Изменение концентраций неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающего предприятия микроводорослью *Chlorella vulgaris*. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 191–199. doi: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-191-199

Bich N. N., Yaziz M. I., Bakti N. A. K. Combination of *Chlorella vulgaris* and *Eichhornia crassipes* for wastewater nitrogen removal // Water Res. 1999. Vol. 33(10). P. 2357–2362. doi: 10.1016/S0043-1354(98)00439-4

Chen W., Liu J., Chu G., Wang Q., Zhang Yu., Gao Ch., Gao M. Comparative evaluation of four *Chlorella* species treating mariculture wastewater under different photoperiods: Nitrogen removal performance, enzyme activity, and antioxidant response // Bioresour. Technol. 2023. Vol. 386. Art. 129511. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129511

Wang C., Yu X., Lv H., Yang J. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater by the green

alga *Chlorella* sp. // J. Environ. Biol. 2013. Vol. 34(2). P. 421–425.

Wang L., Min M., Li Y., Chen P., Chen Y., Liu Yu., Wang Y., Ruan R. Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant // Appl. Biochem. Biotechnol. 2010. Vol. 162. P. 1174–1186. doi: 10.1007/s12010-009-8866-7

Widjaja A., Chien C. C., Ju Y. H. Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris* // J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2009. Vol. 40(1). P. 13–20. doi: 10.1016/j.jtice.2008.07.007

References

Bich N. N., Yaziz M. I., Bakti N. A. K. Combination of *Chlorella vulgaris* and *Eichhornia crassipes* for wastewater nitrogen removal. *Water Res.* 1999;33(10):2357–2362. doi: 10.1016/S0043-1354(98)00439-4

Chen W., Liu J., Chu G., Wang Q., Zhang Yu., Gao Ch., Gao M. Comparative evaluation of four *Chlorella* species treating mariculture wastewater under different photoperiods: Nitrogen removal performance, enzyme activity, and antioxidant response. *Bioresour. Technol.* 2023;386:129511. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129511

Dubovik O. S., Markevich R. M. Improvement of biotechnology of nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technology, Biotechnology, Geoecology.* 2016;4:186. (In Russ.)

Ivanova L. A., Myazin V. A., Korneikova M. V., Fokina N. V., Evdokimova G. A., Redkina V. V. It's time to clean up the Arctic. Creation of phyto-treatment system for post-treatment of mining wastewater from nitrogen compounds. Apatity: KSC RAS; 2021. 88 p. doi: 10.37614/978.5.91137.449.5 (In Russ.)

Kirilina T. V. Efficiency assessment of wastewater pretreatment using unicellular and multicellular hydrobionts. *Bulletin of Kazan Technological University.* 2013;8(16);200–203. (In Russ.)

Lozovik P. A., Galashina N. E. Change in the chemical composition of the water of the Kenti river system as a result of technogenic influence. *Trudy Karel'skogo*

nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2017;3:21–35. doi: 10.17076/lim309 (In Russ.)

Meshengisser Y. M., Shchetinin A. I., Esin M. A. Removal of nitrogen and phosphorus by an active sludge. *Municipal Urban Utilities.* 2006;74:36–45. (In Russ.)

Savichev O. G. Biological wastewater treatment using bog biogeocenoses. *Izvestia of Tomsk Polytechnic University.* 2008;312(1):69–74. (In Russ.)

Shcheglov G. A. Changes of inorganic nitrogen compounds concentration in a mining enterprise wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Vestnik of MSTU.* 2023;26(2):191–199. doi: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-191-199. (In Russ.)

Solnyshkova M. A., Pashkevich M. A. Study of biological water purification efficiency from nitrates with bioplato. *Natural and Technical Sciences.* 2018;5(119):169–173. (In Russ.)

Solnyshkova M. A. Reduction of surface water pollution by inorganic nitrogen compounds in the impact zone of mining enterprises in Murmansk region: Summary of PhD (Cand. of Tech.) thesis. St. Petersburg; 2020. 133 p. (In Russ.)

Wang C., Yu X., Lv H., Yang J. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater by the green alga *Chlorella* sp. *J. Environ. Biol.* 2013;34(2):421–425.

Wang L., Min M., Li Y., Chen P., Chen Y., Liu Yu., Wang Y., Ruan R. Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2010;162:1174–1186. doi: 10.1007/s12010-009-8866-7

Widjaja A., Chien C. C., Ju Y. H. Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2009;40(1):13–20. doi: 10.1016/j.jtice.2008.07.007

Zubov M. G., Boyarshinov S. F., Zubov G. M., Kulikov N. I., Shramov Yu. M., Litt Yu. V., Nekrasova V. K., Nozhevnikova A. N. Biotechnology of wastewater treatment with immobilization of activated sludge and nitrogen removal. *Water Supply and Sanitary Engineering.* 2013;8:72–75. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 30.05.2023; принята к публикации / accepted: 13.09.2023.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Щеглов Глеб Андреевич

аспирант, инженер лаборатории междисциплинарных эколого-экономических исследований

e-mail: Gleb_ap@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Shcheglov, Gleb

Doctoral Student, Engineer at the Laboratory for Interdisciplinary Ecological-Economic Studies

УДК 061.22 : 91 (470.22)

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ОТДЕЛЕНИЯ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ, ОСНОВАННАЯ НА НАУЧНЫХ ПРИНЦИПАХ

Н. Н. Филатов

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

Рассматривается деятельность Отделения Русского географического общества в Республике Карелия (Отделение РГО в РК) с момента его утверждения в 1945 г. как Карело-Финского филиала Всесоюзного географического общества и по 2023 г. Охарактеризованы разные этапы работы Отделения, отмечены периоды ее активизации и ослабления, названы причины этого. Показан большой вклад в научную и образовательную деятельность общества Карельского филиала АН СССР, Карельского государственного педагогического института и Петрозаводского государственного университета. Подробно представлен начавшийся с 1995 года плодотворный этап работы Отделения РГО в РК, когда ее стратегической целью стало проведение научных исследований, образовательной деятельности, экспедиций, путешествий, внедрение результатов исследований в решение практических задач для обеспечения развития Республики Карелия. Представлены достижения Отделения РГО в РК в исследовании природных, культурных и исторических памятников Севера, в изучении Белого моря, водопадов и озер, петроглифов, карельской березы, в организации разнообразных экспедиций в Арктику, по морям и озерам, издании различных атласов территории и монографий о климате и водоемах, книг и справочников для образовательной деятельности. Обозначены пути дальнейшего развития Отделения РГО в Республике Карелия.

Ключевые слова: Русское географическое общество; проведение научных исследований; образовательная деятельность; популяризация географической науки

Для цитирования: Филатов Н. Н. Деятельность Отделения Русского географического общества в Республике Карелия, основанная на научных принципах // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 117–133. doi: 10.17076/lim1812

N. N. Filatov. SCIENCE-BASED ACTIVITIES OF THE REPUBLIC OF KARELIA BRANCH OF THE RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY

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

The article dwells up on the activities of the Russian Geographical Society's Branch in the Republic of Karelia (RGS Karelian Branch) since its establishment in 1945 as the Karelian-Finnish Branch of the All-Union Geographical Society up to 2023. Different phases in the work

of the Branch are described, pointing out the activity rises and slumps and the causes thereof. It is demonstrated that substantial contributions to the scientific and educational activities of the organization have been made by the Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences, Karelian State Pedagogical Institute, and Petrozavodsk State University. A more detailed account is given for the productive phase in the RGS Karelian Branch operation which started in 1995, when it adopted scientific research, educational activities, expeditions, travels, and implementation of research results into practice for the benefit of the Republic of Karelia as its strategic objectives. The achievements of the RGS Karelian Branch in exploring the natural, cultural, and historical heritage of the North, in studying the White Sea, waterfalls and lakes, petroglyphs, curly birch, in organizing various expeditions to the Arctic, to seas and lakes, in publishing diverse atlases of the territory and monographs on the climate and waterbodies, study and reference books are recounted. The alleys for further development of the RGS Karelian Branch are outlined.

Keywords: Russian Geographical Society; research; educational activities; popularization of the geographical science

For citation: Filatov N. N. Science-based activities of the Republic of Karelia Branch of the Russian Geographical Society. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 117–133. doi: 10.17076/lim1812

Введение

Русское географическое общество (РГО) внесло значительный вклад в научные исследования и освоение территории России. На протяжении всей своей истории РГО тесно взаимодействовало с Академией наук, 300-летний юбилей которой отмечается в 2024 г. Среди руководителей общества были выдающиеся ученые, путешественники Ф. П. Литке, П. П. Семенов-Тянь-Шанский, Ю. М. Шокальский, Н. И. Вавилов, Л. С. Берг, Е. Н. Павловский, С. В. Калесник, А. Ф. Трешников. Федор Петрович Литке являлся одним из организаторов, входил в руководство Императорского Русского географического общества, но в 1864–1882 гг. был еще и Президентом Императорской Санкт-Петербургской академии наук. В Петрозаводске жил и работал Константин Иванович Арсеньев – один из инициаторов создания Русского Императорского географического общества, известный ученый-географ, статистик, академик Российской (Императорской) академии наук. В советский период Общество длительное время, с 1938 по 1992 г., официально входило в систему Академии наук СССР. Отличительная черта РГО – использование в своей деятельности научных подходов и принципов, чтобы служить интересам Отечества, развитию географической науки и популяризации географических знаний. Отделение РГО в Республике Карелия также постоянно следовало в своей работе традициям и принципам, заложенным корифеями отечественной науки.

РГО в Карелии. Начало

Филиал Всесоюзного географического общества (так поначалу называлось РГО) в Карело-Финской ССР был утвержден академиком Л. С. Бергом на заседании президиума ВГО 25 сентября 1945 года (рис. 1). Инициатива создания филиала принадлежала пятерым



Рис. 1. Документ, подписанный академиком Л. С. Бергом в 1945 г., об учреждении Отделения РГО в Республике Карелия

Fig. 1. Document signed by academician L. S. Berg in 1945 founded the Karelian Branch of the Russian Geographical Society

петрозаводчанам – сотрудникам Карело-Финского государственного университета д. б. н. С. В. Герду, заведующему кафедрой ихтиологии и гидробиологии, д. г.-м. н. В. С. Слодкевичу, заведующему кафедрой геологии, проректору университета, В. Н. Чернову, заведующему кафедрой ботаники, а также сотрудникам Карело-Финского отделения ВНИОРХ – директору П. В. Зыкову и заведующему лабораторией ихтиологии к. б. н. В. В. Покровскому [Литвин, 1995]¹. Членами филиала общества были педагоги, научные работники, представители различных специальностей из Петрозаводска и других населенных пунктов Карелии. К концу 1946 года в филиале ВГО КФССР насчитывалось 58 человек (<https://www.rgo.ru/ru/otdelenie-v-respublike-kareliya/ob-otdelenii/istoriya>). На первом этапе работа велась по нескольким секциям: географии вод, геологии, ботаники, зоологии, этнографии и археологии. К началу 1960-х годов работа Карельского филиала ВГО приостановилась, уменьшилось число его членов, так как многие из них перешли в другие общественные организации. К 1964 г. в филиале общества числилось всего 19 человек.

Деятельность Карельского филиала ВГО возобновилась в 1964 г. под руководством д. г. н. Г. С. Бискэ, сотрудницы Института геологии Карельского филиала АН СССР (КФ АН СССР). Активно подключились руководители и сотрудники КФ АН СССР Ю. И. Полянский, П. А. Васильев, В. А. Соколов и др. Оживилась работа нескольких секций, проводились экскурсии ученых из разных регионов СССР, были организованы экспедиции по четвертичной геологии и геоморфологии Карелии. В 1968 г. по решению президиума ВГО для улучшения работы Карельский филиал стал отделом Северного филиала, в который входили также отделы Мурманской и Архангельской областей. Карельский отдел был ведущим в изучении вопросов учебной, школьной географии, создании пособий, проведении лекций и бесед с преподавателями географии Карельского государственного педагогического института (КГПИ). В начале 1970 г. стал выходить телевизионный географический журнал «От Ладоги до Беломорья», который вела Г. С. Бискэ. Карельскими учеными из КФ АН СССР были опубликованы книга «Карелия глазами путешественников и исследователей XVIII–XIX вв.», учебное пособие «География Карельской АССР», которое в дальнейшем выдержало еще несколько изданий. Вместе с Г. С. Бискэ в обществе активно трудились К. Г. Лаврова, Г. Ц. Лак,

И. М. Экман. Помогали обществу руководители КФ АН СССР Н. И. Пьявченко, В. А. Соколов, С. В. Григорьев. Но в 1970–1980-е годы вновь наметился спад в работе отдела. Действующей оставалась секция плейстоцена, которая объединяла сотрудников лаборатории четвертичной геологии и геоморфологии Института геологии (руководитель И. М. Экман) и активно работала секция медицинской географии (рук. С. М. Левин). В 1980-е годы членами Карельского отдела Географического общества СССР, в основном сотрудниками Карельского филиала АН СССР, составлена серия карт к «Медико-географическому справочнику КАСССР» при участии КФ АН СССР, Минздрава Карелии, ВГО. Справочник опубликован в Петрозаводске под редакцией известного специалиста Военно-медицинской академии А. А. Келлера [Медико-географический..., 1990].

В 1983 г. при Карельском отделе ВГО была создана секция «История географических открытий в Арктике», которая в 1985 г. преобразовалась в научно-спортивный клуб «Полярный Одиссей» (рук. В. Л. Дмитриев). В 1981–1985 гг. группа энтузиастов дальних морских путешествий во главе с В. Л. Дмитриевым совершила плавание в Белом, Баренцевом и Карском морях на моторной шхуне «Полярный Одиссей» (<https://polar-odyssey.org/>). А в 1986 г. состоялась крупная экспедиция, посвященная 125-летию журнала «Вокруг света», на парусной шхуне «Полярный Одиссей», сделанной в клубе. В 1989 г. Виктор Дмитриев и его единомышленники организовали экспедицию в Арктику от Архангельска до архипелага Шпицберген под эгидой Всесоюзного географического общества.

В 1990 году на изготовленных в клубе копиях древнерусских парусно-гребных лодей «Вера», «Надежда» и «Любовь» (рис. 2) члены клуба прошли от Петрозаводска по Волге и Дону, по Азовскому и Черному морям, вышли через Босфор и Дарданеллы в Средиземное море, посетили гору Афон и остров Патмос, Миры Ликийские и Метеоры. В 1992 году прошли из Генуи вдоль побережья Италии, Франции и Испании, через Гибралтарский пролив вышли в Атлантический океан. И в том же году на коче «Помор» члены клуба прошли вдоль побережья «Русской Америки». Совершив труднейший зимний переход через Балтику и Северное море, лодья «Святитель Николай» пришла на стоянку в английский порт Бристоль в 1997 году. В августе 2000 г. клуб «Полярный Одиссей» посетил известный российский тележурналист и путешественник Юрий Сенкевич (рис. 3). Но, несмотря на деятельность клуба, в целом работа ВГО в Карелии в 1980-е годы не была активной.

¹ Деятельность филиала общества до 1990 г. описана по материалам А. С. Литвина.



Рис. 2. Гавань Морского историко-культурного центра «Полярный Одиссей» в Петрозаводске

Fig. 2. Harbor of the Polar Odyssey historical cultural centre and marine museum in Petrozavodsk

На новом этапе деятельности

ВГО, которое до 1991 г. возглавлял академик А. Ф. Трешников, в 1992 г. было переименовано в Русское географическое общество. Руководили обществом известные профессора Санкт-Петербургского университета: в 1991–2000 гг. – С. Б. Лавров, в 2000–2002 гг. – Ю. П. Селиверстов, а в 2002–2009 гг. – адмирал А. А. Комарицын. В 1994 г. кафедру географии КГПИ и Институт водных проблем Севера (ИВПС) Карельского научного центра РАН (быв-

ший КФ АН СССР) посетил секретарь РГО к. г. н. А. О. Бринкен. Решались организационные вопросы по возрождению деятельности РГО в Карелии, и 21 ноября 1995 г. Президентом РГО профессором С. Б. Лавровым и ученым секретарем общества А. О. Бринкеном был подписан документ о Географическом обществе Карелии (рис. 4). ИВПС совместно с кафедрой географии КГПИ организовал первую за долгие годы конференцию общества, которая была посвящена 150-летию Русского географического общества [К 150-летию..., 1995]. В том же году



Рис. 3. Ю. А. Сенкевич в гостях у клуба «Полярный Одиссей»

Fig. 3. Yu. A. Senkevich visiting the Polar Odyssey club

в Санкт-Петербурге, на съезде РГО, в котором от Карелии принимала участие делегация во главе с Н. Н. Филатовым, обсуждалась тема экологического кризиса в стране, вопросы геополитики. Рассматривались перспективы разработки цифровых баз географических данных, правил их использования и обмена, защиты авторских прав.

Итак, в 1995 г. филиал ВГО в Карелии преобразован в Географическое общество Карелии (название почти сразу было уточнено как Карельское отделение РГО (КО РГО)), которое объединило представителей Карельского научного центра РАН, Карельского государственного педагогического института (с 1996 г. университета (КГПУ), а с 2009 г. – академии (КГПА)), Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ), историко-культурного клуба «Полярный Одиссей», Национального музея Республики Карелия и др. Председателем Отделения избран д. г. н. Н. Н. Филатов.

Большую помощь в организации и размещении КО РГО оказал Карельский научный центр РАН, традиционно многие годы поддерживавший деятельность РГО. Заседания общества проводились несколько раз в год в основном в помещении ИВПС КарНЦ РАН, ИЭ КарНЦ РАН, но иногда – в КГПА и в замечательном зале Национального музея РК (рис. 5).

С 2010 г. были поставлены задачи развития географии в Карелии, популяризации результатов исследований и достижений естественных и общественно-экономических наук, внедрения информатизации, ГИС, совершенствования доступа к информационным ресурсам Интернет и укрепления географического образования в Республике Карелия. Важными являлись вопросы организации и проведения путешествий, полевых исследований и экспедиций, активизация издательской деятельности (выпуск научно-публицистических и образовательных материалов, учебников, карт), участие в плановых мероприятиях Центрального подразделения РГО, внедрение результатов научно-исследовательской деятельности

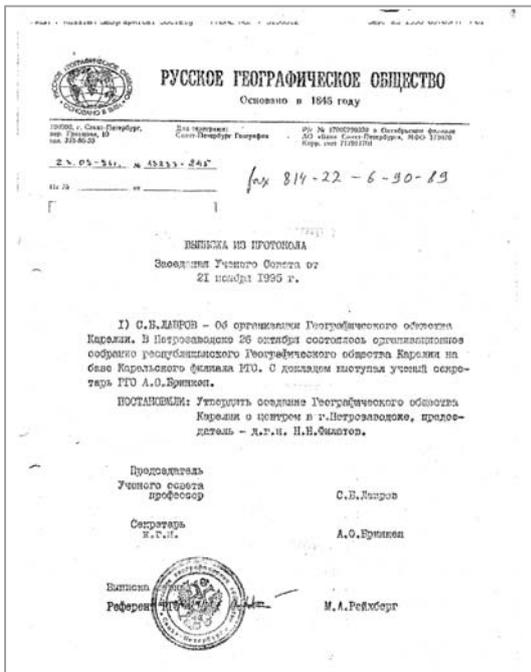


Рис. 4. С 1995 года начался новый этап в деятельности Отделения РГО в РК

Fig. 4. Since 1995, a new stage began in the work of the Karelian Branch of the Russian Geographical Society



Рис. 5. Заседание Отделения в Национальном музее Республики Карелия

Fig. 5. Meeting of the Branch at the National Museum of the Republic of Karelia

в области географии, социологии и экономики в целях обеспечения устойчивого развития республики; развитие экологического и научно-познавательного туризма, организация и проведение научно-практических и учебных конференций и семинаров. В «Известиях Русского географического общества» публикуются научные труды по изучению ландшафтов [Богданова, 2021] и климата [Филатов и др., 2007; Назарова и др., 2022].

После 1995 г. КО РГО организовало несколько значимых конференций: «Проблемы устойчивого развития региона»; «Арсеньевские чтения» (проводятся при поддержке Института экономики КарНЦ РАН и РГО); «Геология и география Карелии», посвященная 90-летию со дня рождения Галины Сергеевны Бискэ. Члены общества активно участвовали во всероссийских международных конференциях «Инновации Европейскому Северу» (2005 и 2007 гг.), в Международной выставке «Нева» в Санкт-Петербурге в 2007 и 2009 гг.

До этого, еще в конце 1997 г., по инициативе В. Л. Дмитриева началась разработка совместно с ИВПС КарНЦ РАН проекта «Полярный Одиссей». Руководитель клуба предложил к 100-летию путешествия Ф. Нансена построить уникальное судно из композитных материалов, тем более сделать это можно было в Карелии (рис. 6). В. Л. Дмитриев, Ю. М. Наумов,

Н. Н. Филатов и ученые-полярники ААНИИ В. А. Волков и В. Т. Соколов подготовили научную программу работ на судне для исследований на Северном полюсе.

Программа была поддержана в 1999 г. бюро Отделения океанологии, физики атмосферы и географии РАН и подписана академиком Ю. А. Изразлем. Идеи проекта обсуждались на заседаниях Карельского отделения Русского географического общества, в ААНИИ и Нансеновском международном центре по окружающей среде и дистанционным методам, а также на Международной выставке «Нева» в Санкт-Петербурге. Этот проект судна – своеобразная реанимация реализованной идеи Ф. Нансена, но с использованием совершенно новых технических средств и материалов. Реализация проекта могла бы дать новый импульс российским и международным постоянным исследованиям в морских высокоширотных районах. Поддержку проекту оказывала в первую очередь В. Н. Пивненко, первый заместитель председателя Комитета Госдумы по региональной политике и проблемам Севера и Дальнего Востока. Она неоднократно советовалась с А. Н. Чилингаровым, чем и как можно помочь реализовать проект. Для Всероссийской выставки «Инновации Европейскому Северу» в 2005 г. в Петрозаводске нами был предложен проект судна «Полярный Одиссей». Этот проект

Всероссийская выставка 2005 г. «Инновации Европейскому Северу»



Рис. 6. Стенд с проектом судна «Полярный Одиссей» для Всероссийской выставки «Инновации Европейскому Северу», проходившей в 2005 г. в Петрозаводске

Fig. 6. Stand of the Polar Odyssey ship project for the All-Russian exhibition *Innovations to the European North* in 2005, Petrozavodsk

поддержали такие известные компании, как ГКНПЦ им. Хруничева (Москва), КБ «Восток» (Санкт-Петербург), принимавшие участие в выставке, многие организации, министерства и ведомства РФ. Минэкономразвития РК выделил ИВПС КарНЦ РАН и нашим партнерам – клубу «Полярный Одиссей», КГПУ, КБ «Восток» – финансовую поддержку, и мы заключили договор для проведения проектных разработок. Работа была успешно завершена, отчет отправился в Минэкономразвития РФ в Москву. Но никакой реакции на проект мы отсюда не получили. В КБ «Восток» изготовили деревянный макет судна, который украшал Международную выставку «Нева» в 2007 г. в Экспоцентре в Санкт-Петербурге, там же был организован семинар, на котором обсуждалась с коллегами из ААНИИ, ИО РАН, Арктической академией, полярниками, моряками возможность использования судна «Полярный Одиссей» в Арктике. Проект был дружно поддержан участниками конференции.

После 1 мая 2010 г. Карельское отделение РГО насчитывало уже более 80 членов. Активно работал член РГО, известный путешественник, спортсмен В. А. Симонов, возглавляющий карельскую туристическую компанию «Скифы Тур». В Национальном музее РК (директор М. Л. Гольденберг, фотограф И. Ю. Георгиевский) была организована экспозиция петроглифов Карелии. Члены секции «Осударева дорога» (С. А. Никулин, Ю. В. Русанов, М. Ю. Данков, С. Б. Потахин, С. П. Гриппа и др.) занимались поиском и изучением сухопутной трассы, проложенной по наказу Петра I в 1702 г. от пристани Нюхча на Белом море к Повенцу на Онежском озере [Гриппа и др., 2001]. В Петрозаводском государственном университете была создана лаборатория ГИС, возглавил ее член РГО А. М. Шредерс, который активно занимался созданием исторических карт региона. В издательстве ПетрГУ работали члены РГО О. В. и И. А. Черняковы. Членами РГО систематически проводились исследования петроглифов Белого моря и Онежского озера (Н. В. Лобанова), Е. Г. Сойни выполняла исследования творчества Николая Рериха о Севере. На кафедре географии КГПА велась работа с молодежью, проводились семинары и конференции (зав. каф. С. Б. Потахин, а позднее Р. Ф. Антонова). В КГПА в 2000 г. изданы лекции «География Карелии» [Потахин и др., 2000], прочитанные в разные годы по спецкурсу «География Карелии», в рамках курсов «Региональная физическая география» и «Экономическая и социальная география России», в которых обобщается накопленный опыт сотрудников кафедры географии КГПА. КРОО «Фонд творческой инициа-

тивы» под эгидой Министерства образования и науки РФ и при поддержке Отделения РГО в РК издана серия учебников «Моя Карелия» для 6–9-х классов общеобразовательных учреждений республики. В подготовке глав учебника приняли участие сотрудники кафедры географии КГПА члены Отделения С. Б. Потахин, С. П. Гриппа, А. С. Литвин. Материал, представленный в указанном издании, посвящен изучению всех разделов географии Карелии [Моя Карелия..., 2011–2014].

При ИВПС КарНЦ РАН был создан Учебно-научный центр «Водные проблемы», который возглавляла Т. И. Регеранд. Этот центр стал партнером Карельского отделения РГО, активно сотрудничал с Международным Балтийским университетом (Уппсала, Швеция) и кафедрой географии КГПА, а также с ПетрГУ по совершенствованию подготовки географов – специалистов по окружающей среде. Проводились теоретические и практические занятия по курсам и спецкурсам «География материков и океанов», «Географические информационные системы», «Химия окружающей среды», «Гидрогеология», «Агрометеорология», «Сельскохозяйственная мелиорация», «Лесная метеорология и климатология», «Гидрология и гидротехнические сооружения», «Экологическая токсикология», «Эволюционная экология». Учебно-научный центр под эгидой Отделения регулярно проводил конференции по различным вопросам окружающей среды, издавал учебные пособия, сборники [см., например, «Изучение...», 2007]. С 2015 г. ИВПС КарНЦ РАН при участии Отделения РГО в РК начал выпуск серии «Лимнология», а затем «Лимнология и океанология» (отв. ред. Н. Н. Филатов, отв. секретарь Т. И. Регеранд) в журнале «Труды Карельского научного центра РАН».

С 1995 г. члены Карельского отделения постоянно участвовали в работе съездов РГО, на которых принимались важные решения в жизни Русского географического общества, выработывалась стратегия и направления его развития. На съезде в Архангельске в 2000 г. обсуждались вопросы экологии, устойчивого развития страны и регионов. Прекрасно был организован и проведен съезд в 2005 г. в Кронштадте, где обсуждались вопросы глобализации, технологического прогресса, в том числе и в географии, развития геоинформационных технологий. Надо отметить, что Карельское отделение добилось в 1995–2008 гг. довольно хороших результатов в разработке ГИС «Водные объекты РК», информационно-справочных систем озер и рек. Издан «Каталог озер и рек Карелии» [2001], опубликованы монографии

«Изменения климата Восточной Фенноскандии и колебания уровня крупнейших озер Европы» [Филатов, 1997], «Климат Карелии» [2004], «Изучение водных объектов и природно-территориальных комплексов Карелии» [2007]; «Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов» [2007]. В КГПУ издано учебное пособие «Географические информационные системы. Применение ГИС при изучении окружающей среды» [Филатов, 1997]. Карельским географам присуждена победа на фестивале «Пулковский меридиан» в номинации «Тайны мироздания» за исследования и фильм «Онежские петроглифы. Новые открытия» (С. А. Никулин). За все эти достижения Карельское отделение РГО было награждено в 2004 г. Дипломом Ученого совета РГО (рис. 7). В 2008 г. в Петрозаводск прибыли руководители общества: президент РГО А. А. Комарицын, ученый секретарь А. О. Бринкен и вице-президент общества профессор Ю. Н. Гладкий, которые побывали в КарНЦ РАН, КГПУ, ознакомились с состоянием дел в Карельском отделении РГО. Руководителям РГО были продемонстрированы

возможности проведения очередного Съезда РГО в Карелии, получены заверения о поддержке от главы республики С. Л. Катанандова (также члена РГО). После этого Ученый совет РГО принял решение о том, что следующий съезд РГО пройдет в 2010 г. в Республике Карелия, и началась активная подготовка карельских географов к этому событию.

Но в годы, предшествовавшие проведению съезда, Россию затронул финансовый кризис, Русское географическое общество находилось в непростой финансовой ситуации, хотя и продолжало функционировать, сохраняя традиции и по-прежнему делая все возможное для развития географии. В 2009 году в Москве досрочно был собран внеочередной съезд РГО. В работе съезда участвовали четыре представителя Карельского отделения. На этом съезде был избран новый президент РГО С. К. Шойгу, создан Попечительский Совет РГО, председателем которого стал президент страны В. В. Путин.

С 2010 года Карельское отделение РГО переименовано в Отделение РГО в Республике Карелия. В том же году оно получило в числе первых в стране достаточно крупный грант РГО «Историко-географические памятники Европейского Севера России» (рис. 8).

Для реализации гранта были привлечены сотрудники почти всех институтов КарНЦ РАН, кафедры географии КГПА, Морского историко-культурного центра «Полярный Одиссей» (рис. 9). Фотографом проекта являлся И. Ю. Георгиевский. Всего в ходе полевых исследований летом и осенью 2010 г. изучено и документировано 14 природно-культурных комплексов и отдельных объектов по берегам и на островах Онежского и Ладожского озер, Беломорско-Балтийского канала и в юго-западной части Белого моря (рис. 10). Проведенные исследования отличал комплексный характер; применялись методы ландшафтных, геолого-геоморфологических, дендрохронологических, лимнологических, археологических исследований. Исследованиями были охвачены как хорошо изученные ранее, так и малоизвестные объекты.

Наибольший интерес в отчете представляют результаты ландшафтных исследований Муромского природного заказника и острова Кижы, открытие нового поселения эпохи неолита на Чёлмужской косе Онежского озера, обнаружение неизвестных наскальных изображений в низовьях р. Выг (Залавруга). Интерес представляют также выводы о возможности использования для познавательного туризма таких объектов сравнительно недавней истории, как Беломорско-Балтийский канал.



Рис. 7. Среди наград Отделения РГО в РК – Почетный диплом Русского географического общества. 2004 г.

Fig. 7. Among the awards of the Karelian Branch of the Russian Geographical Society is an Honorary Diploma of the Russian Geographical Society, 2004



Рис. 8. Отделение РГО в РК одним из первых в стране получило грант Попечительского Совета РГО. 2010 г.

Fig. 8. Karelian Branch of the Russian Geographical Society was one of the first in our country to receive a grant from the Board of Trustees of the Russian Geographical Society, 2010



Рис. 9. Молодые члены РГО – участники экспедиции 2010 г. М. Богданова, А. Толстиков и М. Потехин

Fig. 9. M. Bogdanova, A. Tolstikov and M. Potakhin, young members of the Russian Geographical Society who took part in the expedition in 2010



Рис. 10. Схема маршрута экспедиции по гранту РГО «Историко-географические памятники Европейского Севера России» с фотографиями отдельных памятников. Фото И. Ю. Георгиевского

Fig. 10. Route of the expedition under the grant of the Russian Geographical Society Historical and Geographical Monuments of the European North of Russia with photographs of individual monuments. Photo by I. Yu. Georgievsky

Создана информационная база указанных объектов, подготовлен фотоальбом, телевизионные фильмы, которые посвящены замечательным географическим, историко-культурным памятникам Севера России. Прекрасные фильмы об экспедиции сняли О. В. Чупин (КГПА) и телевизионная компания «Первый ТВЧ» (Санкт-Петербург). Эти фильмы демонстрировались на совещаниях, конференциях, а также по телевидению, в том числе и на канале «Моя планета». По результатам гранта РГО издан красочный альбом «Природные и культурно-исторические памятники Белого моря, Онежского и Ладожского озер» [Богданова и др., 2010] в издательстве «Версо» (Петрозаводск), а также атлас Онежского озера [Онежское..., 2010], создано два фильма об экспедиции, компакт-диск (автор разработки Ю. В. Русанов), выпущены красочные буклеты и открытки (рис. 11).

В 2010 г. члены РГО из Карелии принимали участие в XIV съезде в Санкт-Петербурге, на котором председатель Попечительского Совета РГО В. В. Путин обозначил миссию РГО – «вдохновлять людей на любовь к России».

На 1 февраля 2011 года в Отделении РГО по Республике Карелия зарегистрировано 97 действительных членов. Стратегической целью деятельности стало проведение научных исследований, образовательной работы

и популяризация географической науки, внедрение результатов исследований в практическую деятельность в целях обеспечения социально-экономического развития Республики Карелия.

После 2011 г. в Отделении РГО в РК было решено разработать проект собственного российского судна и осуществлять регулярные научные экспедиции в Арктику. За это взялся великий русский путешественник Федор Конюхов, который вместе с сыном несколько раз приезжал в Петрозаводск, где не только обсуждалась идея постройки судна и организация экспедиции на Северный полюс, но уже строился прототип судна, на котором Федор собирался пойти к полюсу в одиночку. Но средств на постройку «Полярного Одиссея» так и не удалось получить. Тогда у Ф. Конюхова и известного путешественника, географа В. Симонова из Карелии, который профессионально занимается подготовкой в питомнике собак к работе в упряжках, возникла идея организовать экспедицию на Северный полюс на собаках (рис. 12). Цель экспедиции – доказать возможность пройти маршрутом от Северного полюса к северу Гренландии, подняться там на ледник в том месте, где пытался, но не смог осуществить задуманное известный японский путешественник Наоми Уэмура. Экспедиция от



Рис. 11. Члены Отделения РГО в РК после презентации альбома по результатам гранта РГО 2010 г.

Fig. 11. Members of the Karelian Branch of the RGS after the presentation of the album based on the results of the study supported with a grant from the Russian Geographical Society, 2010



Рис. 12. Буклеты экспедиции Ф. Конюхова и В. Симонова «Карелия – Северный полюс – Гренландия», 2013 г.
 Fig. 12. Booklets of the expedition of F. Konyukhov and V. Simonov Karelia – North Pole – Greenland, 2013

Отделения РГО в РК, поддержанная правительством Карелии, членом Совета Федерации РФ В. Н. Пивненко, РГО и рядом других организаций, стартовала из Петрозаводска 3 апреля 2013 г. Большая часть маршрута была успешно пройдена путешественниками, но в Гренландию попасть не удалось из-за резкого потепления весной 2013 г.

Как уже было отмечено, деятельность общества в Карелии после 2010 г. значительно оживилась. Появилось много разнообразных проектов и грантов. В Отделение РГО по РК ежегодно поступало до 20 заявок на их получение. Стало возможным организовывать уникальные экспедиции, создавать атласы, фильмы, выставки и пр. Отделение РГО в РК участвовало в фестивалях и выставках РГО в Москве. Одним из значимых мероприятий, прошедших под эгидой Русского географического общества, стал Второй международный форум «Арктика – территория диалога». В 2013 г. на Белом море был организован международный семинар с полевым выездом «Трансграничные водосборы: Финляндия и Россия – водосбор Белого моря» с экспедицией на Белое море и сессией для молодых ученых. 2020 г. ознаменовался участием в цифровом всероссийском молодежном форуме активного туризма «Вместе по России». Отделение РГО в РК проводило разнообразные конкурсы для школьников – «Моя малая Родина», «Моя Арктика», по международной программе «Балтийский Университет», официальные конкурсы Русского географического общества.

В 2012 г. Отделением РГО в РК получен грант на разработку, а в 2013 г. – на издание справочника «Озера Карелии» [2013] в рамках крупного общероссийского проекта «Россия – страна озер». Справочник содержит систематизиру-

ванную информацию о 225 наиболее изученных водоемах Карелии (рис. 13). Представленные материалы получены на цифровой основе с использованием ГИС-технологий, включают географическую привязку, данные по морфометрии, многолетнему водному балансу, термическому и ледовому режимам, гидрохимии, донным отложениям, гидробиологии, рыбам, сведения о хозяйственном использовании озер. Издание предназначено для широкого круга специалистов, занимающихся проблемами

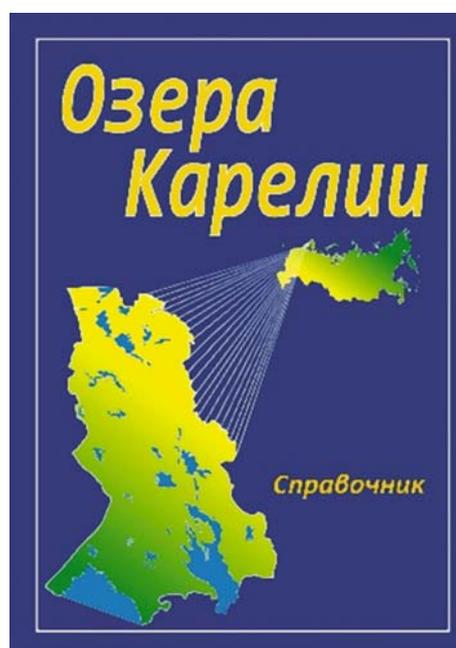


Рис. 13. Справочник «Озера Карелии» издан при поддержке гранта РГО 2013 г.

Fig. 13. Publication of the directory *Lakes of Karelia* was sponsored with a grant from the Russian Geographical Society 2013

использования и охраны водных ресурсов, научных работников, студентов естественно-научных специальностей и просто читателей, интересующихся озерами Карелии.

В клубе «Полярный Одиссей» В. Л. Дмитриев и Ю. В. Русанов по Президентскому гранту и при участии членов Отделения РГО организовали выставки исторического флота России во многих городах Карелии. Важной целью проекта является пропаганда достижений российских путешественников-географов, привлечение внимания международной общественности к развитию яхтинга и водного туризма. В рамках деятельности РГО проводились конференции, издана первая туристическая карта Карелии, создан электронный атлас Белого моря и водосбора, электронный атлас Карелии [Филатов и др., 2015] (грант РГО за 2015–2016 гг.).

В 2016 г. в Петрозаводске состоялась научно-практическая конференция «Форум «Полярных Одиссеев». На конференции обсуждались вопросы развития маломерного народного флота как инструмента рационального использования природно-культурного ресурса Карелии. На форуме присутствовали многочисленные участники морских экспедиций на исторических деревянных кораблях Морского центра «Полярный Одиссей», а также представители правительства РК, администрации Петрозаводска, РГО и других общественных организаций. С. А. Никулин, Ю. В. Русанов и В. М. Шелехов провели несколько экспедиций и выполнили исследования по проекту «Осударева дорога» для обоснования нового туристического маршрута (https://vk.com/osudareva_doroga_1702). Два гранта РГО получила группа молодых географов Карелии на проекты «Алмазна сыплется гора» и «Неизвестные водопады Карелии» (рук. М. Б. Потахин и А. В. Толстикова, 2015–2016 и 2020–2021 гг.). Ими выполнены поиск и описание новых водопадов, которых теперь насчитывается около 100 [Потахин и др., 2021], что позволит значительно расширить возможности Карелии по развитию туризма, организации новых маршрутов (<http://nwp.krc.karelia.ru/waterfalls//data/resursy.htm>).

Надо отметить, что Отделение ведет постоянную грантовую деятельность, которая заключается в проведении семинаров по подготовке заявок на гранты, представлении заявок на конкурс грантов РГО. С 2010 по 2022 г. региональным отделением получено 11 грантов. Благодаря им реализовались многочисленные проекты в самых разных сферах: исследования и просветительская деятельность, разработка атласов и карт, сохранение редких животных и природных достопримечательностей.

Например, одним из символов Карелии является карельская береза. Она известна во всем мире благодаря своей неповторимой узорчатой древесине, которая ценится за красоту и твердость (рис. 14). Но численность ее природных популяций стремительно сокращается, поэтому особо остро стоит вопрос сохранения ее ценных генотипов. Проблемой сохранения карельской березы профессионально занимается Л. В. Ветчинникова, член РГО, доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории лесных биотехнологий Института леса КарНЦ РАН. Она выполнила работу по двум грантам РГО: «Географические закономерности распространения карельской березы» (2014–2015 гг.) и «Карельская береза – объект живой природы: сохраним или потеряем?» (2016–2017 гг.). В реализации проекта принимали участие не только научные работники, но и студенты, школьники и даже ребята из детских садов Петрозаводска [Ветчинникова, 2018].

Большую работу с молодыми географами, любителями природы ведет член РГО Е. В. Кузнецова, начальник отдела экологического про-



Рис. 14. Изучение и сохранение популяций карельской березы входит в круг научных интересов членов Отделения РГО в РК

Fig. 14. Study and conservation of the Karelian birch populations is in the area of expertise of the members of the Karelian Branch of the Russian Geographical Society



Рис. 15. Онежские петроглифы. Фото И. Ю. Георгиевского

Fig. 15. Onega petroglyphs. Photo by I. Yu. Georgievsky

свещения Дирекции особо охраняемых территорий (ООПТ) Республики Карелия, обладающая просто энциклопедическими познаниями о своем родном крае и безгранично ему преданная. Она является куратором добровольческой волонтерской команды краеведческого клуба «София». Круг ее ответственности – просветительская работа с молодежью, походы, экспедиции, цель которых сохранять уникальные природные памятники, заботиться об уменьшении антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Многие годы проводятся исследования карельских петроглифов – уникального источника информации о жизни древнего человека. Археолог Н. В. Лобанова занимается исследованием петроглифов и открывает новые наскальные рисунки на севере европейской части России и в Северной Фенноскандии. В 2021 г. беломорские и онежские петроглифы вошли в Список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО (рис. 15).

Значительно оживилась работа КО РГО по подготовке молодых географов на кафедре географии КГПА (заведующие С. Б. Потахин, а позднее Р. Ф. Антонова), когда ректором стал один из руководителей Отделения РГО С. П. Гриппа. Именно он является и бессменным организатором в республике Всероссийского географического диктанта, который обычно проводится (в 2023 году уже в 9-й раз)

на базе ПетрГУ и еще на нескольких площадках Карелии.

Есть в Отделении РГО и такие энтузиасты, которые за свой счет организуют интереснейшие экспедиции. Так, члены РГО братья Андрей и Иван Калинины реализовали в 2019 г. проект «Северный ветер». Они построили небольшое парусное деревянное судно наподобие байдарки Ф. Конюхова и прошли сложным маршрутом вдоль западного берега Белого моря, Беломорско-Балтийским каналом и по Онежскому озеру в Петрозаводск. Отметим активность членов РГО «Чупинский морской яхт-клуб» (рук. Ю. Н. Рыбаков), которые проводят экспедиции на Белом море, в Порьей губе, на острове Великом, на территории Кандалакшского заповедника с целью развития туризма. Большую работу как географ выполняет мастер спорта по лыжному туризму, путешественник, полярный гид-проводник, член РГО В. А. Симонов. Он организатор и руководитель экспедиций и туров в Арктику, на Кавказ, в Сибирь и Забайкалье, директор туристического комплекса и питомника северных ездовых собак «Скифы Тур» (Карелия), основным профилем которого является подготовка арктических экспедиций и туров. Он же является учредителем и основным организатором первых в России международных гонок на собачьих упряжках на средние дистанции «По земле Сампо». В 2016 году В. А. Симонов создал в Карелии Центр

Арктической подготовки и стал экспедиционным лидером учений спецназа ВДВ на Северном полюсе. Ведет работу с молодежью, организуя лыжные, пешие экспедиции и переходы на собачьих упряжках.

Надо отметить, что работе с молодежью Отделение РГО в РК уделяет особое внимание. Например, активно взаимодействует с Молодежным клубом Президентского кадетского корпуса, проводит лекции для аспирантов, студентов, молодых ученых по современным проблемам географии, совместно с кафедрой географии ПетрГУ организован студенческий фото- и видеофестиваль по материалам путешествий, полевых практик, отдыха студентов.

Отделение РГО в РК сотрудничает с другими региональными отделениями. Так, в Вологде на совместном заседании РГО «Развитие региональных отделений Русского географического общества» был подписан протокол о сотрудничестве Вологодского и Карельского отделений РГО. В 2020 г. совместно с Отделением РГО в Республике Саха (Якутия) проведены экспедиции на озере Себян-кюель в Якутии по поиску самолета Леваневского, который потерпел крушение 13 августа 1937 г. От Карелии в экспедиции в поисках самолета участвовал член РГО В. А. Поздеев, он же представитель оргкомитета по увековечению памяти первых героев Советского Союза (<https://lamynha.sakha.gov.ru/news/front/view/id/3213286>). Членом Отделения РГО В. Л. Дмитриевым разработан проект межрегионального сотрудничества «Паруса Одисеев». В 2011–2013 гг. реализован проект «Чукотка – территория открытий». Наладивание межрегиональных связей в Арктическом регионе – одна из целей этого проекта. В качестве партнеров рассматриваются администрации Архангельской области, Республики Карелия, Республики Саха (Якутия), Ямало-Ненецкого АО, Великого Устюга. Проект должен был привлечь внимание к Российскому Северу, способствовать развитию регионов и напомнить о ярких страницах российской истории и географии. Специально для этого проекта в клубе «Полярный Одиссей» в Карелии построены два коча, которые в навигацию 2013 года прошли от Тикси до Анадыря, практически повторив путь экспедиции Дежнева.

Отметим созданный в Отделении РГО в РК книжный фонд при ИВПС КарНЦ РАН, составленный как из собственных книг членов Отделения РГО (многие из них передал член РГО В. Н. Семенов), так и подаренных предпринимателем, членом Попечительского Совета РГО Ф. Паулсенем около сотни книг, альбомов о географах, путешественниках, исследователях

Севера, Арктики, изданных в основном в издательстве «Паулсен». Он же предоставил грант «Жизнь подо льдом» фонда «Элемо» (Швейцария) для исследования Ладожского и Онежского озер (2015–2018 гг.).

Одной из важнейших задач карельских географов является разработка концепции и создание электронной, а затем и печатной версии комплексного географического атласа Республики Карелия (рис. 16). Атлас подготовлен по инициативе ИВПС КарНЦ РАН и регионального отделения РГО [Атлас..., 2021]. Это научное издание, разработанное по современным данным различных научных и образовательных организаций: КарНЦ РАН, ПетрГУ, Национального музея РК, а также ряда министерств и ведомств республики. Атлас является комплексным, включающим характеристику природы, населения и хозяйства региона. Состоит из 70 согласованных разномасштабных карт (1:2 000 000 – 1:6 000 000). Картографические изображения атласа созданы средствами геоинформационных технологий, в качестве основы использована цифровая топографическая карта масштаба 1:1 000 000, полученная в Федеральном картографо-геодезическом фонде. Основная цель создания атласа по гранту Русского географического

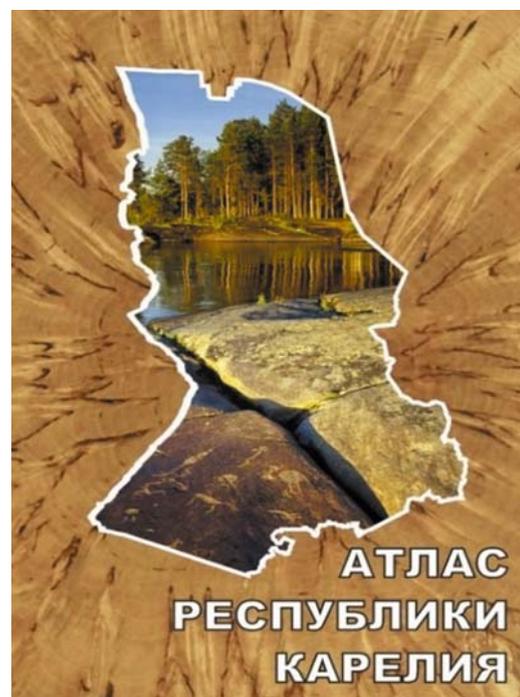


Рис. 16. Атлас Республики Карелия, созданный в 2021 г.

Fig. 16. Atlas of the Republic of Karelia, created in 2021

общества – поддержка современных географических знаний населения, интересующегося природой, экономикой, культурными, природными и историческими памятниками Карелии. Атлас издан при финансовой поддержке ВОО РГО, получил многочисленные положительные отзывы, востребован в научной сфере, образовании, представляет интерес для туристов, жителей региона и посвящен 100-летию образования Республики Карелия. Но тираж атласа в 2021 г. был небольшой, всего 500 экз., и с учетом востребованности он с некоторыми уточнениями переиздан в 2023 г. тиражом 1000 экз. за счет средств издательства «Версо» (г. Петрозаводск) [Атлас..., 2023].

В 2021 г. вышли из печати обобщающие работы о Карелии, подготовленные членами РГО в РК – «Республика Карелия» в монографии «Современная Россия: географическое описание нашего Отечества» [Филатов и др., 2021], а в 2022 г. – работа «Озерная Карелия» в книге «Самые привлекательные места для туризма в России» [Филатов, 2022]. Эти публикации осуществлены за счет грантов ВОО РГО, полученных Комиссией по развитию туризма (рук. академик В. М. Котляков).

Кроме этого, Отделение РГО в РК постоянно ведет экспертную и аналитическую работу в составе Ученого совета РГО, Экспертного совета РГО (до 2021 г.), Совета регионов (до 2020 г.), Комиссии РГО по развитию туризма, Наградной комиссии РГО.

У Отделения РГО в Республике Карелия большие планы. Среди прочего предстоит разработать проект и создать экспозицию в Национальном музее РК, посвященную такому великому человеку, как Константин Иванович Арсеньев – один из инициаторов создания Русского Императорского географического общества, академик Российской (Императорской) академии наук. Он многие годы жил и работал в Карелии (Олонецкой губернии). В 1813 г. К. И. Арсеньев дал комплексное описание Олонецкой губернии, а в 1818 г. издал «Краткую всеобщую географию», которая стала одним из самых распространенных учебников по географии – выдержала 20 изданий в течение 30 лет. Ни один из современных учебников не может сравниться с таким числом переизданий. В Петрозаводске Константин Иванович закончил жизненный путь и нашел упокоение в Крестовоздвиженском соборе г. Петрозаводска.

Кроме того, планируется создать стенд, посвященный деятельности Русского географического общества в Карелии, улучшить информационную деятельность через сайт Общества, продолжить активную работу по привлечению

к проектам регионального отделения новых членов, в особенности молодежи. Есть намерение создать Попечительский совет отделения РГО в РК, активизировать деятельность Комиссии по ОПТ и многое другое.

В настоящее время в Совет регионального отделения РГО входят: Н. Н. Филатов (руководитель), С. П. Гриппа, В. Л. Дмитриев, Н. В. Лобанова, Е. В. Кузнецова, С. Б. Потахин, Л. Е. Назарова, В. И. Болтушкин, В. А. Симонов, Т. И. Регеранд, А. В. Толстиков (секретарь).

Партнерами Отделения РГО в Республике Карелия являются: Карельский научный центр РАН, Институт водных проблем Севера и Научно-учебный центр «Водные объекты Севера», кафедра наук о Земле и геотехнологий ПетрГУ, Морской историко-культурный центр «Полярный Одиссей», туристическая компания «Скифы Тур», Национальный музей РК, Общество охраны природы, ООО «Осударева дорога», ООО «Люди и моря», Общество краеведов, Дайвинг-клуб «Онего».

Работа Отделения РГО в РК держится на таких энтузиастах, как президент клуба «Полярный Одиссей» В. Л. Дмитриев и его сын А. В. Дмитриев, научных работниках, географах, путешественниках: С. П. Гриппа, И. Ю. Георгиевский, М. С. Богданова, Л. В. Ветчинникова, М. Л. Гольденберг, О. В. Дерусова, Е. В. Кузнецова, Л. Е. Назарова, С. А. Никулин, Ю. М. Наумов, Н. В. Лобанова, С. Б. Потахин, М. С. Потахин, Т. И. Регеранд, Ю. В. Русанов, В. А. Симонов, А. В. Толстиков, **А. М. Шредерс** и многих других, всего же в составе Отделения около 130 членов.

В 2020 г. в связи с 75-летним юбилеем регионального отделения получило поздравление от Первого вице-президента РГО А. Н. Чилингарова. В поздравлении отмечается, что в Отделении РГО по Республике Карелия делается многое для развития географии в регионе, популяризации естественных и общественно-экономических научных достижений, полученных учеными Карелии. Отмечаются достижения в экологическом и научно-познавательном туризме, что важно как для развития Республики Карелия, так и России в целом.

В 2020 г. Отделение РГО в РК было награждено одной из высших наград Общества – золотой медалью Федора Петровича Литке. В письме, подписанном А. А. Манукяном, говорилось, что награда вручается за исследования влияния климата на крупные озера и моря Севера Евразии. Отмечен вклад в научные исследования, проведение экспедиций, в развитие туризма в регионе. И эта награда по праву принадлежит всем членам Отделения

РГО в Республике Карелия, которые на протяжении многих лет способствовали плодотворной деятельности общества.

Автор выражает глубокую признательность секретарям Отделения Л. Е. Назаровой (до 2020 г.) и А. В. Толстикovu (с 2020 г. по настоящее время), а также Т. И. Регеранд за активное ведение в течение 28 лет организационной работы регионального отделения. Благодарит ВОО «Русское географическое общество», ее Исполнительную Дирекцию и Департамент регионального развития за многолетнее сотрудничество, координирование и поддержку деятельности Отделения. Огромная благодарность партнерам за сотрудничество и помощь. Сердечное спасибо Совету регионального отделения, всем членам Отделения РГО в Республике Карелия за совместную работу по изучению,



описанию, исследованию, развитию нашего замечательного края. Автор также благодарит С. П. Гриппу и Т. И. Регеранд за полезные замечания по рукописи.

Литература

- Атлас Республики Карелия / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Verso, 2021. 48 с.
- Атлас Республики Карелия: Изд. 2-е, испр. / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Verso, 2023. 48 с.
- Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Ред. Н. Н. Филатов, А. Ю. Тержевик. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 349 с.
- Богданова М. С., Гриппа С. П., Лобанова Н. В., Медведев П. В., Потахин М. С., Потахин С. Б., Русанов Ю. В., Толстик А. В., Дмитриев В. Л., Филатов Н. Н. Природные и культурно-исторические памятники Белого моря, Онежского и Ладожского озер. Петрозаводск: Verso, 2010. 95 с.
- Богданова М. С. Ландшафты Заонежского полуострова (Республика Карелия) // Изв. РГО. 2021. Т. 153, вып. 1. С. 32–58. doi: 10.31857/S086960712101002X
- Ветчинникова Л. В. Карельская береза – объект живой природы. Буклет по результатам гранта РГО. 2018. 8 с.
- Гриппа С. П., Потахин С. Б., Шелехов А. М. Некоторые результаты комплексных физико-географических исследований трассы «Осударева дорога» / Изв. РГО. 2001. Т. 133, вып. 2. С. 53–58.
- Изучение водных объектов и природно-территориальных комплексов Карелии: Учебное пособие / Карельский науч. центр РАН, Ин-т водных проблем Севера, Карельский гос. пед. ун-т; ред. Филатов Н. Н. и др. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 170 с.
- Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова, А. В. Литвиненко. Петрозаводск: Карел. науч. центр, 2001. 289 с.
- Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карел. науч. центр, 2004. 224 с.
- К 150-летию Русского географического общества: программа и тезисы научной конференции 18–19 апреля 1995 года: секция географии. Петрозаводск: КГПИ, 1995. 27 с.
- Литвин А. С. 50 лет Карельского филиала Русского географического общества // К 150-летию Русского географического общества. Петрозаводск: КГПИ, 1995. С. 8–10.
- Медико-географический справочник Карельской АССР [Карты] / Карел. науч. центр АН СССР, Мин-во здравоохранения КАСР, Воен.-мед. акад. им. С. М. Кирова, Геогр. общество СССР; сост. Н. В. Альтшуллер [и др.]; гл. ред. канд. мед. наук А. А. Келлер; ред. канд. геол.-мин. наук Г. Ц. Лак. Петрозаводск, 1990. 195 с.
- Моя Карелия: учебники для учащихся 6, 7, 8, 9 классов / Ред. Т. И. Агаркова и др. Петрозаводск: Фонд творческой инициативы, 2011–2014.
- Назарова Л. Е., Исакова К. В., Калинин Н. М., Балаганский А. Ф. Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Изв. РГО. 2022. Т. 154, № 1. С. 28–36. doi: 10.31857/S0869607122010086
- Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 461 с.
- Онежское озеро. Атлас / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
- Потахин С. Б., Андрианова Е. В., Антонова Р. Ф. и др. География Карелии: Лекции. Петрозаводск: КГПА, 2000. 80 с.
- Потахин М. С., Толстик А. В., Богданова М. С., Георгиев А. П., Георгиевский И. Ю., Потахин С. Б. Изучение водопадов Карелии Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 4. С. 64–77. doi: 10.17076/lim1372
- Филатов Н. Н., Богданова М. С., Дерусова О. В. и др. Электронный атлас Карелии / Отделение РГО в РК. 2015. URL: <http://water.krc.karelia.ru/project.php?id=734&plang=r> (дата обращения: 10.09.2023).
- Филатов Н. Н. Географические информационные системы. Применение ГИС при изучении окружающей среды. Учебное пособие. Петрозаводск: КГПА, 1997. 92 с.
- Филатов Н. Н., Гриппа С. П., Дружинин П. В., Кодолова Т. А., Потахин С. Б. Республика Карелия // Современная Россия: географическое описание нашего Отечества. Европейская Россия и Урал. Кн. 2. Регионы Европейской России и Урала / Отв. ред. В. М. Котляков, А. И. Зырянов; ред.-сост. С. Э. Мышлявцева. М.: Паулсен, 2021. 576 с. С. 39–47.
- Филатов Н. Н. Изменения климата Восточной Фенноскандии и колебания уровня крупнейших озер Европы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1997. 144 с.
- Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Сало Ю. А. Региональный климат: возможные сценарии изменения климата Карелии. Похолодание или потепление? // Изв. РГО. 2007. Т. 139, вып. 3. С. 72–79.
- Филатов Н. Н. Озерная Карелия // Самые привлекательные места для туризма в России. М.: Медиа-ПРЕСС, 2022. С. 152–173.

References

- Agarkova T. I. et al. (ed.). My Karelia: Textbooks for students of the 6th, 7th, 8th, 9th grades. Petrozavodsk: Fond tvorcheskoi initsiativy; 2011–2014. (In Russ.)
- Al'tshuller N. V. et al. (comp.). Medical geography directory of the Karelian ASSR (maps). Petrozavodsk; 1990. 195 p. (In Russ.)
- Bogdanova M. S., Grippa S. P., Lobanova N. V., Medvedev P. V., Potakhin M. S., Potakhin S. B., Rusanov Yu. V., Tolstikov A. V., Dmitriev V. L., Filatov N. N. Natural and cultural-historical monuments of the White Sea, Lakes Onego and Ladoga. Petrozavodsk: Verso; 2010. 95 p. (In Russ.)
- Bogdanova M. S. Landscapes of the Zaonezhsky Peninsula (Republic of Karelia). *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2021;153(1):32–58. doi: 10.31857/S086960712101002X (In Russ.)
- Filatov N. N. (ed.). Atlas of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: Verso; 2021. 48 p. (In Russ.)
- Filatov N. N. (ed.). Atlas of the Republic of Karelia: 2nd ed., rev. Petrozavodsk: Verso; 2023. 48 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Bogdanova M. S., Derusova O. V. et al. Electronic atlas of Karelia. The Karelian Branch of the RGS. 2015. URL: <http://water.krc.karelia.ru/project.php?id=734&plang=r> (accessed: 10.09.2023). (In Russ.)
- Filatov N. N. Climate changes in Eastern Fennoscandia and fluctuations in the level of the largest lakes in Europe. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1997. 144 p. (In Russ.)
- Filatov N. N. Geographic information systems. Application of GIS in environmental studies. A tutorial. Petrozavodsk: KGPA; 1997. 92 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Grippa S. P., Druzhinin P. V., Kodolova T. A., Potakhin S. B. Republic of Karelia. *Sovremennaya Rossiya: geograficheskoe opisanie nashego Otechestva. Evropeiskaya Rossiya i Ural. Kn. 2. Regiony Evropeiskoi Rossii i Urala = Modern Russia: geographical description of our homeland. European Russia and the Urals. Book 2. Regions of European Russia and the Urals*. Moscow: Paulsen; 2021. 576 p. C. 39–47. (In Russ.)
- Filatov N. N. et al. (eds.). Study of water bodies and natural-territorial complexes in Karelia: A textbook. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 170 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Litvinenko A. V. (eds.). Catalogue of lakes and rivers of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. 289 p. (In Russ.)
- Filatov N. N. (ed.). Climate of Karelia: variability and impact on water bodies and catchments. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. 224 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Nazarova L. E., Salo Yu. A. Regional climate: possible scenarios for climate change in Karelia. Cooling or warming? *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2007;139(3):72–79. (In Russ.)
- Filatov N. N. Lacustrine Karelia. *Samye privlekatel'nye mesta dlya turizma v Rossii = The most attractive places for tourism in Russia*. Moscow: Media-PRESS; 2022. P. 152–173. (In Russ.)
- Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia. A reference book. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 461 p. (In Russ.)
- Filatov N. N. (ed.). Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Terzhevik A. Yu. (eds.). The White Sea and its catchment area under the impact of climatic and man-induced factors. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 349 p. (In Russ.)
- Grippa S. P., Potakhin S. B., Shelekhov A. M. Some results of comprehensive physical and geographical studies of the Osudareva Road. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2001;133(2):53–58. (In Russ.)
- Litvin A. S. 50 years of the Karelian Branch of the Russian Geographical Society. *K 150-letiyu Russkogo geograficheskogo obshchestva = To the 150th anniversary of the Russian Geographical Society*. Petrozavodsk: KGPI; 1995. P. 8–10. (In Russ.)
- Nazarova L. E., Isakova K. V., Kalinkina N. M., Balaganskii A. F. The impact of climate warming on the winter runoff of the Shuya River and the consequences for the zoobenthos of Lake Onego. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2022;154(1):28–36. doi: 10.31857/S0869607122010086 (In Russ.)
- Potakhin S. B., Andrianova E. V., Antonova R. F. et al. Geography of Karelia: Lectures. Petrozavodsk: KGPA; 2000. 80 p. (In Russ.)
- Potakhin M. S., Tolstikov A. V., Bogdanova M. S., Georgiev A. P., Georgievskii I. Yu., Potakhin S. B. Study of Karelian waterfalls by the Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2021;4:64–77. doi: 10.17076/lim1372 (In Russ.)
- To the 150th anniversary of the Russian Geographical Society: program and abstracts of the scientific conference (April 18–19, 1995): geography section. Petrozavodsk: KGPI; 1995. 27 p. (In Russ.)
- Vetchinnikova L. V. Karelian birch is an object of living nature. Booklet on the results of the Russian Geographical Society grant. 2018. 8 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 12.09.2023; принята к публикации / accepted: 04.10.2023.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Филатов Николай Николаевич

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, профессор,
главный научный сотрудник, Председатель
Отделения РГО в Республике Карелия

e-mail: nfilatov@rambler.ru

CONTRIBUTOR:

Filatov, Nikolai

RAS Corr. Academician, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,
Chief Researcher, Chairman of the Republic of Karelia
Branch of the Russian Geographical Society

ШКОЛА ПОЛЯРНЫХ ЛИМНОЛОГОВ ПРОДОЛЖАЕТСЯ

С 9 по 15 апреля 2023 года в Мурманской области прошла Вторая школа-практика полярных лимнологов. Мероприятие состоялось на берегу озера Имандра, в 20 км от г. Апатиты. Школу открывали директор Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) КНЦ РАН д. т. н. Д. В. Макаров, руководитель лаборатории географии и гидрологии Института водных проблем Севера (ИВПС) КарНЦ РАН к. г. н. А. В. Толстикова и руководитель лаборатории водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН к. б. н. Д. Б. Денисов. Как и два года назад, в апреле 2021 года, организацией мероприятия занимались сотрудники Кольского и Карель-

ского научных центров, выступая в качестве основных лекторов для студентов, аспирантов и молодых ученых. Финансовую и информационную поддержку школе оказал Проектный офис развития Арктики (ПОРА), выделив грант на проведение мероприятия и обеспечив съемку репортажа о школе-практике.

Первая школа-практика полярных лимнологов была организована также в Мурманской области в качестве альтернативы зимним лимнологическим курсам (Winter Limnology course), которые в течение многих лет проводились в Финляндии на базе Lammi Хельсинкского университета, куда, помимо наших иностранных





Отбор пробы воды при помощи батометра

коллег, активно ездили начинающие исследователи озер из России для повышения своих лимнологических знаний и навыков. Также с самого начала мероприятие находится в одной сцепке с Международной молодежной конференцией «Водные ресурсы: изучение и управление», которая проводится силами сотрудников ИВПС КарНЦ РАН в г. Петрозаводске. Ее участники позже могут приехать в Апатиты, чтобы развить свои теоретические и практические представления по изучению озерных экосистем.

Вторая школа-практика приняла около 35 человек, включая организаторов, лекторов и слушателей, из Москвы, Санкт-Петербурга, Мурманска, Апатитов, Кировска, Петрозаводска, Архангельска, Калининграда и Миасса. Участники жили и работали в загородной гостинице «Тиетта», расположенной прямо на берегу озера Имандра. В ходе теоретической части мероприятия ведущие ученые-лимнологи из Мурманской области и Карелии прочли участникам лекции по гидрологии, гидрохимии, гидрофизике, гидробиологии и геофизике, а затем на практических занятиях продемонстрировали важнейшие полевые навыки работы на льду водоема. В частности, участники познакомились с методами отбора проб воды с разных горизонтов и проб донных отложений, в том числе для послойного разбора



А. В. Толстиков работает со своей группой



Работа группы В. А. Даувальтера



Д. Б. Денисов на дискуссии после одной из лекций

кернов и дальнейшей палеолимнологической реконструкции. Гидробиологи рассказали, каким образом происходит исследование планктона, бентоса и ихтиофауны озер в зимнее время, гидрологи и геофизики продемонстрировали участникам *in situ* методы изучения физико-химических параметров водной толщи с помощью различных зондов, а верхних слоев донных отложений озера – георадаром.

Следует отметить, что проведение школы-практики в Мурманской области на примере арктического водоема имеет важное значение с точки зрения меняющихся климатических условий, на которые чутко реагируют полярные экосистемы Северного полушария. Кроме того, Мурманская область – это промышленно развитый и высокоурбанизированный регион мира, что позволяет показать влияние локальных антропогенных факторов на озера и все их составляющие – биоту и абиогенные параметры. Некоторые участники школы даже увезли с собой пробы воды и отложений озера Имандра в свои научные организации, чтобы провести их анализ и сравнить с пробами из водных объектов, которые они исследуют в своих регионах. Такой подход однозначно расширяет наши общие представления о состоянии озер России, расположенных в разных климатических условиях и имеющих различную антропогенную нагрузку.

В ходе Второй школы-практики полярных лимнологов кроме научно-образовательной части для слушателей была организована и культурная программа. Участники посетили Музейно-выставочный центр Кольского филиала

АО «Апатит» и Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН. Кроме того, все желающие побывали на экскурсии в музее снежных и ледяных скульптур «Снежная деревня» и поднимались на гору Айкуайвенчорр Хибинского массива в районе курорта «Большой Вудъявр». В первый и последний день школы перед участниками выступили известные популяризаторы науки из Мурманской области и Карелии. Лекции касались не только исследования водных объектов, но и совсем далеких от лимнологии тем. Например, Дмитрий Денисов рассказал о мифах, связанных с якобы существовавшей страной Гипербореей, а Евгений Боровичев – о том, как нас могут (или не могут) обманывать самые обычные растения.

В заключительный день школы-практики участники представили доклады, подготовленные на основе тех знаний и данных, которые они получили в ходе мероприятия. Доклады были групповыми, так как изначально слушатели школы разделились на четыре команды – гидрохимии, гидробиологии, ихтиологии и гидрофизики. Также в один из дней некоторые участники сделали индивидуальные доклады на темы исследований, которые они проводят в своих научных и образовательных организациях. В резолюции мероприятия, учитывая просьбы участников, озвучено коллективное решение организовать следующую школу-практику в летний период.

*З. И. Слуковский, В. А. Толстикова,
Д. Б. Денисов, Н. Е. Галахина, С. И. Вокуева.
Фото З. Слуковского, К. Данилина*

VII КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ИЗУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ» (ВСЕРОССИЙСКАЯ ЛИМНОЛОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА-ПРАКТИКА) (Петрозаводск, 4–8 сентября 2023 г.)

Конференция была организована Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) и проведена на базе ФИЦ «Карельский научный центр РАН». В оргкомитет входили коллеги из Петрозаводского и Вологодского государственных университетов, ИПЭН АН РТ, ИППЭС КНЦ РАН, а также Отделения Русского географического общества в РК. Данное мероприятие соответствует задачам «Десятилетия науки и технологий 2022–2031», основными из которых являются привлечение талантливой молодежи в научную сферу, вовлечение исследователей и разработчиков в решение важнейших задач развития общества и страны, повышение доступности информации о достижениях и перспективах отечественной науки для граждан России.

Общее число зарегистрировавшихся участников составило 70 человек. В работе конференции в очно-дистанционном режиме приняли участие научные сотрудники, студенты, магистранты, аспиранты и преподаватели из 17 организаций, включая научные организации и высшие учебные заведения Петрозаводска, Санкт-Петербурга, Вологды, Калининграда, Москвы, Апатитов, Архангельска, Перми и Ярославля.

Открывал мероприятие заместитель генерального директора ФИЦ «Карельский научный центр РАН» д. г.-м. н. А. И. Слабунов, с приветственными словами к участникам обратились ведущий научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов и проректор по научной работе ПетрГУ д. т. н. В. С. Сюнев.



На конференции были представлены устные и стендовые доклады по нескольким актуальным направлениям, объединенным в следующие секции:

- Моделирование гидрологических и биогеохимических процессов;
- Управление водными ресурсами и их охрана;
- Проблемы трансграничных водных объектов России;
- Качество поверхностных вод в условиях антропогенного воздействия;
- Современное состояние биоресурсов водоемов;
- Донные отложения поверхностных водных объектов;
- Гидрофизические процессы в поверхностных водных объектах.

В первый день работы конференции прошла пленарная сессия. На ней было представлено 10 докладов. Рассматривались такие важные и актуальные вопросы, как современные проблемы изучения озер России и пути их решения, изменение и изменчивость основных характеристик климата Карелии, разработка региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, исследования тяжелых металлов в донных отложениях озер на территории РФ и загрязнения Онежского озера частицами микропластика, пространственная организация сообществ обрастателей, оценка изменений речного стока Крыма в XXI веке, геоинформационное картографирование, а также современные дистанционные методы для исследования подводных ландшафтов. Кроме того, опытом проведения Полярной школы-практики поделился один из основных ее организаторов со стороны ИППЭС КНЦ РАН З. И. Слукровский. С 2021 г. школа-практика проходит на комплексном мониторинговом полигоне Кольского научного центра РАН, находящемся на берегу оз. Имандра.

Секции «Моделирование гидрологических и экосистемных процессов», «Управление водными ресурсами и их охрана», «Проблемы трансграничных водных объектов России» были объединены в одну (председатель к. г. н. А. В. Толстиков) в связи с небольшим количеством участников. Представлены доклады о методике измерения гидрографических характеристик арктических рек с использованием векторных моделей, динамике стока реки Охта, оценке рекреационного потенциала прибрежных зон водных объектов и вопросе утилизации соединений азота из сточных вод горнодобывающего предприятия Карелии в лабораторных условиях водорослью *Chlorella*, выращенной при азотном голодании. По результатам работы секции отмечено, что новые методы определения рекреационного потенциала и утилизации загрязняющих веществ в последнее время все чаще появляются в литературе и успешно применяются на практике. Значителен интерес у исследователей к водным объектам, расположенным в Арктической зоне России.

Участники секции «Качество поверхностных вод в условиях антропогенного воздействия» (председатель к. т. н. М. Б. Зобков) представили и обсудили 5 докладов, касающихся вопросов химического состава региональных поверхностных вод и их загрязнения, качественной их оценки с применением абиотических и биотических индексов. По итогам работы секции отмечалось, что в современных условиях

происходит ухудшение качества поверхностных вод и для предотвращения развития негативных последствий загрязнения и антропогенного эвтрофирования требуется создание эффективной природоохранной инфраструктуры, строительство очистных сооружений.

В рамках работы секции «Современное состояние биоресурсов водоемов» (председатель к. б. н. И. А. Мухин) представлены 8 устных докладов. Рассмотрены все звенья трофической цепи: микробиологическое сообщество, фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос и рыбы. Также рассмотрены вопросы оценки качества воды притоков Онежского озера по микробиологическим показателям с учетом региональных особенностей химического состава их вод, сезонной динамики потенциально токсичных видов цианобактерий в фитопланктоне литорали Куршского залива Балтийского моря, фитопланктона прибрежной части озера Виштынецкого, биотопической приуроченности некоторых видов мшанок Севера европейской части России, размерной структуры зоопланктона озер Сисьярви и Лещевое (Валаамский архипелаг, Ладожское озеро), состояние глубоководного бентоса Онежского озера в условиях климатических изменений, роли *Gmelinoides fasciatus* в питании рыб Онежского озера, биоценозов района Кижские шхеры Онежского озера.

На секции «Донные отложения поверхностных водных объектов» (председатель к. б. н. З. И. Слукровский) представлены три устных и три стендовых доклада. Поскольку постеры участников были доступны на сайте конференции, авторам предоставили возможность очно представить свои доклады и ответить на вопросы. Участники секции рассказали о результатах исследований озер Архангельской области, Республик Карелия и Татарстан. Доклады посвящались особенностям распределения метана в воде и донных отложениях Онежского озера, химическому составу донных отложений Пертозерского водохранилища, состоянию донных отложений малых озер Заонежского полуострова (Республика Карелия) по данным гранулометрического анализа, исследованиям современных седиментационных процессов в Выгозерском водохранилище, содержанию органической и минеральной составляющих в донных отложениях озер Большого Соловецкого острова (Архангельская область). Группа ученых из г. Казани представила результаты исследований загрязненности илов Монастырской притоки из озера Средний Кабан по данным гранулометрического и химического состава.



В рамках работы секции «Гидрофизические процессы в поверхностных водных объектах» (председатель к. г. н. Г. Э. Здоровеннова) представлялись 10 докладов. Три из них были посвящены вопросам численного моделирования (ImplicitLES) и изучения по данным натурных измерений внутриводоемных процессов при развитии весенней подледной конвекции в мелководных озерах. Еще в трех обсуждались вопросы изменений термического и уровня режимов, режима перемешивания и изменений структуры льда озер Карелии на фоне наблюдаемой изменчивости регионального климата. В остальных докладах были представлены результаты исследований механизмов перемешивания в малых и больших озерах Карелии в периоды открытой воды и ледостава, а также новая методика измерения лимнологических процессов с использованием произведенного в РФ измерительного комплекса. Актуальность разработки подобных измерительных комплексов возрастает в условиях ограничений на приобретение импортного оборудования. Участники секции считают целесообразным сконцентрировать усилия специалистов ИВПС КарНЦ РАН и молодых ученых, студентов, аспирантов родственных научных и образовательных организаций на разработке новых методик измерений гидрофизических параметров, организации и проведении комплексных измерений на озерах, продолжении рядов многолетних измерений, накоплении данных, необходимых для выявления реакции озер на климатические изменения, что вкупе с методами

математического моделирования позволит проводить имитационные и прогностические расчеты для решения актуальных задач природопользования и охраны окружающей среды.

По материалам докладов подготовлены научные статьи для опубликования в серии «Лимнология и океанология» журнала «Труды Карельского научного центра РАН».

В рамках работы конференции состоялась мастер-класс «Проблемы сохранения и анализа гидробиологической информации» (к. б. н. М. Т. Сярки).

Участники мероприятия побывали на экскурсиях в Музее прикладных экологических исследований и Музее геологии докембрия КарНЦ РАН. С. П. Гриппа организовал и провел научную экскурсию «Белые ночи в географии» по маршруту: Петрозаводск – д. Царевичи – Марциальные Воды – каньон реки Суна – палеовулкан Гирвас – водопад Кивач.

Оргкомитет конференции благодарит отдел информационно-технического сопровождения КарНЦ РАН за возможность успешного проведения онлайн-заседаний на интернет-платформе, а также Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН за издание программы конференции.

*Н. Е. Галахина,
председатель оргкомитета*

Материал подготовлен с использованием отчетов председателей секций А. В. Толстикова, Г. Э. Здоровенновой, З. И. Слукковского, А. И. Сидоровой.

ПАМЯТИ АРКАДИЯ ЮРЬЕВИЧА ТЕРЖЕВИКА (1948–2023)

14 мая 2023 г. ушел из жизни ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН Аркадий Юрьевич Тержевик.

Многие годы под его руководством проводились исследования гидрофизических процессов в разнотипных озерах Северо-Запада России. А. Ю. Тержевик стал одним из отечественных исследователей, поднявших на мировой уровень проблему изучения термогидродинамических процессов в покрытых льдом озерах. Во многом благодаря возглавляемым им исследованиям возрос интерес мирового сообщества лимнологов к зимнему периоду. Выведя зимние полевые исследования в озерах Карелии на качественно новый уровень, А. Ю. Тержевик основал одну из наиболее известных исследовательских групп зимней лимнологии в России и в мире. Его работа на посту заведующего лабораторией гидрофизики Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН положила начало уникальной базе знаний о ключевых процессах, формирующих реакцию озер на изменение климата в течение последних 20 лет.

Аркадий Юрьевич Тержевик родился 6 мая 1948 г. в городе Алдане Якутской АССР в семье служащих. В 1972 г. завершил учебу на кафедре океанологии географического факультета Ленинградского университета. В 1972–1974 гг. работал инженером-гидрологом в Запрыб-промразведке в Калининграде. В период с мая 1974 по июнь 1999 г. работал в Институте озераведения Академии наук, в котором занимал должности от старшего лаборанта до старшего научного сотрудника. В 1981–1991 гг. был заместителем начальника Ладожской экспедиции Института озераведения по научной работе и финансовому управлению. В 1991 г. А. Ю. Тержевик защитил диссертацию «Формирование гидрофизических полей в Ладожском озере» на соискание ученой степени



кандидата технических наук (защита состоялась на заседании Ученого совета при Ленинградском научно-исследовательском центре Академии наук). Аркадий Юрьевич участвовал в нескольких международных проектах, направленных на изучение гидродинамики озер. Особенно следует отметить его вклад в изучение термического бара и весенней конвекции подо льдом – явлений, специфических для пресноводных водоемов.

В 1994–1998 гг. Аркадий Юрьевич работал исследователем в Лундском университете (Швеция), в 1999–2001 гг. – старшим исследователем в университете г. Авейру (Португалия). С 2001 г. А. Ю. Тержевик – старший,

а затем ведущий научный сотрудник в Институте водных проблем Севера Карельского научного центра РАН в г. Петрозаводске. В 2002–2016 гг. он заведовал лабораторией гидрофизики института. Под руководством Аркадия Юрьевича успешно развивалось международное сотрудничество лаборатории гидрофизики с Лундским университетом (Швеция), Хельсинкским университетом (Финляндия), Службой погоды Германии и Лейбниц-институтом пресноводной экологии и внутреннего рыболовства (Германия).

Аркадий Юрьевич инициировал ряд международных и национальных проектов, поддержанных Европейской комиссией, ИНТАС, РФФИ и другими научными фондами. Исследования под руководством и при активном участии А. Ю. Тержевика внесли большой вклад в развитие современных представлений о механизмах переноса и перемешивания в покрытых льдом озерах, о физических процессах, контролирующих перенос энергии в поле внутренних волн от больших к малым масштабам, о процессах переноса энергии и парниковых газов в озерных экосистемах высоких широт, потенциально наиболее подверженных изменениям климата. Работы проводились в рамках национальных и международных проектов (1998–2000 гг. – INTAS-97-0734 «The Thermal Structure and Circulation Patterns in Ice-Covered Lakes: Measurements and Modelling»; 2014–2016 гг.: РФФИ № 14-05-91761-АФ_а «Цикл углерода в системе озеро-атмосфера: наблюдения и моделирование. Роль физических процессов в динамике метана в мелководных бореальных озерах»; 2015–2017 гг. – международный проект «Life under ice», финансируемый Foundation pour l'Etude des Eaux de Lemman and EPFL Limnology Center, Switzerland; 2021–2023 гг. – проект РФФИ 21-17-00262 «Перемешивание в бореальных озерах: механизмы и их эффективность»).

Аркадий Юрьевич принял участие в разработке озерной модели FLake, которая широко используется в качестве схемы параметризации озер в моделях численного прогноза погоды (ЧПП), например в локальных моделях COSMO и HIRLAM и в глобальных моделях ICON и IFS. FLake оперативно используется в ряде центров ЧПП, включая Службу погоды Германии (COSMO и ICON), Финский метеорологический институт (HIRLAM) и Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (IFS). FLake также внедрена в модели прогноза погоды Великобритании, Франции и США, в климатические модели CLM (Сообщество CLM) и RCA (Шведский метеорологический и гидрологический институт) и в Канадскую региональную климатическую модель (Environment Canada).

На разных этапах своей научной карьеры Аркадий Юрьевич участвовал в экспедициях на Белом и Норвежском морях и в Атлантическом океане, в 1994–1999 гг. принимал активное участие в полевых работах на озерах Ладожском, Онежском, Ильмене, Кубенском, Белом и Вендюрском.

Список публикаций А. Ю. Тержевика включает более 120 статей в высокорейтинговых реферируемых журналах.

Аркадий Юрьевич отличался широкой эрудицией, высокой трудоспособностью, критическим мышлением и неиссякаемым оптимизмом, пользовался большим авторитетом среди коллег. И главное, Аркадий Юрьевич был прекрасным товарищем и абсолютно надежным человеком. Таким он навсегда останется в наших сердцах.

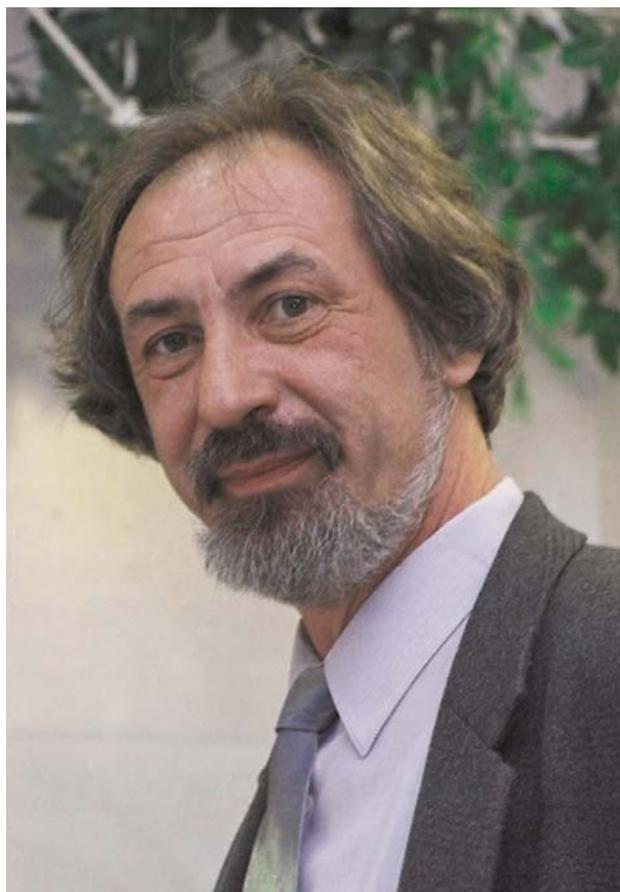
*Г. Э. Здравеннова, Д. В. Миронов,
Г. Б. Кириллин, С. Д. Голосов,
Н. И. Пальшин, Т. В. Ефремова,
Р. Э. Здравеннов, С. Р. Богданов,
коллеги из ИВПС КарНЦ РАН,
Института озераведения РАН*

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА ВАСИЛЬЕВИЧА ЛИТВИНЕНКО (1954–2023)

18 мая 2023 г. не стало старшего научного сотрудника лаборатории географии и гидрологии ИВПС КарНЦ РАН Александра Васильевича Литвиненко, одного из продолжателей традиций водохозяйственных исследований в Карелии, заложенных организатором и многолетним руководителем Отдела водных проблем С. В. Григорьевым.

А. В. Литвиненко родился 25 ноября 1954 г. в селе Новокаменка Великоалександровского района Херсонской области УССР. В 1971 г. окончил Великоалександровскую среднюю школу и поступил на дневное отделение географического факультета Ленинградского госуниверситета им. Жданова на кафедру гидрологии.

После окончания ЛГУ в 1976 г. по распределению поступил на должность инженера в Лабораторию водохозяйственных исследований Отдела водных проблем (ОВП) Карельского филиала АН СССР в Петрозаводске. В 1978–1980 гг. в качестве стажера-исследователя был направлен в Институт географии АН СССР в Москве. В 1981 г. стал старшим инженером, а в 1985 г. – младшим научным сотрудником лаборатории водохозяйственных исследований ОВП. В 1986 г. по конкурсу переведен на должность научного сотрудника. Александр Васильевич подготовил и представил кандидатскую диссертацию по водохозяйственным проблемам региона. В 1980–1984 гг. он работал по теме «Водохозяйственное районирование территории Карельской АССР». При его участии определены закономерности формирования и распределения водных ресурсов как одного из важнейших факторов развития производительных сил. В 1988–1991 гг. он участвовал в исследованиях по разделу «Водные ресурсы и водное хозяйство Европейского Севера» по общесоюзной теме «Комплексный прогноз использования природных ресурсов и развития производительных сил зоны Севера СССР на 1991–2010 гг.».



С 1991 г. приступил к работе в должности старшего научного сотрудника в созданном Институте водных проблем Севера (ИВПС КарНЦ РАН). А. В. Литвиненко являлся ответственным исполнителем многих фундаментальных тем отдела и института. Он успешно реализовал себя в качестве научного руководителя и исполнителя комплексных региональных, международных и хозяйственных тем ИВПС, а также программ TACIS, ИНКО-Коперникус, РФФИ и др. В 1993–1998 гг. он заведует лабораторией водохозяйственных исследований. С начала 1990-х годов им выполнялись работы в сфере

водного хозяйства с учетом новых рыночных отношений. Александр Васильевич принимал деятельное участие в ряде республиканских программ «Развитие водоснабжения Республики Карелия», региональных экологических исследованиях (Суоярвский, Пряжинский, Калевальский, Муезерский и др. районы, Вепская волость), обосновании организации новых природоохранных территорий (проектируемые национальные парки «Калевальский», «Тулос», «Толвоярви», ландшафтные заказники «Сыроватка», «Гридино») и др.

Он являлся ответственным за «водные» блоки крупных межинститутских тем. Так, в 1990–1993 гг. были выполнены исследования по теме «Структура, динамика и прогнозирование водопотребления и водоотведения в районах Европейского Севера». Одной из наиболее значимых можно назвать работу в 1987–1990 гг. «Современное состояние поверхностных источников водоснабжения городов и населенных пунктов республики в связи с их охраной от загрязнения и истощения».

В 1992 и 2006 гг. А. В. Литвиненко активно участвует в работах по экологическому обоснованию строительства газопровода «Штокмановское месторождение». В 1994–1996 гг. выполняет исследования для разработки методических основ составления водохозяйственного кадастра, участвует в подготовке справочно-информационного издания, предназначенного для обеспечения органов государственного управления всех уровней, предприятий, организаций. Александр Васильевич участвовал и в международных программах. В частности, большое внимание уделял совместному с Финляндией проекту «Программа развития водоснабжения Республики Карелия». Результаты данного исследования послужили основой для разработки республиканской программы «Обеспечение Республики Карелия питьевой водой» (1999 г.), которая вошла в федеральную целевую программу «Обеспечение населения России питьевой водой».

С 2000 г. в связи с изменением структуры ИВПС А. В. Литвиненко становится старшим научным сотрудником лаборатории географии и гидрологии КарНЦ РАН. Он участвует в работах по прогнозированию водопотребления и водоотведения в новых социально-экономических условиях. При его участии подготовлены базы данных, геоинформационные системы подземных вод, карты качества вод, водохозяйственные и климатические карты, ГИС «Гидротехнические сооружения Республики Карелия». Совместно со специалистами лаборатории кибернетики ИПМИ КарНЦ РАН разработана

автоматизированная система «Озера и реки Карелии», которая была передана в министерства и ведомства республики для внедрения. В 2009 г. Александр Васильевич с коллегами разрабатывал структуру и содержание для подсистемы единой географической системы «Водные объекты на территории Республики Карелия», которая передана Министерству природных ресурсов РК.

А. В. Литвиненко с соавторами имеет свидетельства о регистрации четырех баз данных: «Водные объекты Республики Карелия» (2010); «Водохозяйственный комплекс Республики Карелия» (2010); «Водные ресурсы Европейского Севера России и их использование» (2016); «Электронный атлас Белого моря и его водосбора» (2016).

Александр Васильевич автор и соавтор более 150 научных работ, изданных в отечественной и зарубежной печати (тезисы, статьи, коллективные монографии), в том числе глав в монографиях «Каталог озер и рек Карелии» (2001); «Белое море и водосбор» (2007); «White sea: Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics» (2005). Он был соредактором ряда крупных монографий, таких как «Каталог озер и рек Карелии» (2001), «Водлозерские чтения: естественнонаучные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера» (2006), «Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения» (2006), «Водные объекты города Петрозаводска» (2013), «Атлас Онежского озера» (2010); «Атлас Республики Карелия» (2021 и 2023 гг.). Последние 10 лет А. В. Литвиненко активно сотрудничал с журналом «Арктика: экология, экономика», в котором опубликовал в соавторстве несколько статей. Принимал участие с докладами во всероссийских и международных совещаниях (Конгресс работников водного хозяйства, Международные Ладожские симпозиумы, «Озера Евразии» и др.). Александр Васильевич участвовал в подготовке проекта Закона об охране Ладожского и Онежского озер, готовил многочисленные справки о водохозяйственных проблемах по запросам различных министерств и ведомств Карелии.

А. В. Литвиненко много лет преподавал в Петрозаводском государственном университете и Институте управления, экономики и права ПетрГУ при Правительстве РК, где вел курс «Гидрология, гидрометрия и гидротехнические сооружения», и читал подобный курс для аспирантов и молодых специалистов в ИВПС. Он активно работал в Учебно-научном

центре «Водные объекты Карелии и методы их исследования» в ИВПС. С 1977 г. являлся действительным членом Русского географического общества.

За научную, педагогическую и общественную деятельность А. В. Литвиненко награжден Почетными грамотами Исполнительного комитета Петрозаводского городского Совета народных депутатов, руководства г. Петрозаводска, Российской академии наук и профсоюза работников РАН, Карельского научного центра РАН, он также лауреат конкурса научных и научно-популярных работ, посвященного 60-летию КарНЦ РАН.

Александр Васильевич Литвиненко 47 лет работал в Петрозаводске в ОВП и ИВПС, был знающим, высококвалифицированным специалистом-гидрологом, водохозяйственником, внимательным, добрым коллегой, надежным товарищем, прекрасным экспедиционником. Он радовал коллег и близких игрой на гитаре, был заботливым отцом и дедушкой. Светлая память об Александре Васильевиче Литвиненко навсегда останется у всех, кому посчастливилось с ним работать.

*Сотрудники Института
водных проблем Севера КарНЦ РАН*

ПАМЯТИ АНДРЕЯ ПАВЛОВИЧА ГЕОРГИЕВА (1978–2023)

22 июня 2023 г. в возрасте 45 лет ушел из жизни кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН Андрей Павлович Георгиев.

Вся трудовая деятельность Андрея Павловича проходила в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН. Окончив Петрозаводский государственный университет в 2000 году, Андрей Павлович поступил в очную аспирантуру в ИВПС КарНЦ РАН, где проходил обучение под руководством д. б. н. А. А. Лукина, одновременно работая в лаборатории гидробиологии. В 2004 году им подготовлена диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук по теме «Аллопатрические и симпатрические популяции ряпушки водоемов Онежского и Ладожского озер», успешная защита которой прошла в Петрозаводском государственном университете.

С января 2005 по 2013 г. он работал в лаборатории географии и гидрологии, а в 2013–2023 гг. Андрей Павлович трудился в лаборатории гидробиологии.

Все сотрудники ИВПС КарНЦ РАН любили и ценили Андрея Павловича за его дружелюбие, постоянную готовность помочь, поделиться важной информацией. Андрей Павлович был специалистом в области ихтиологических исследований, в том числе по питанию рыб, автором и соавтором более 100 статей, в которых представлены результаты изучения рыбных сообществ водоемов Карелии. Его работы имеют не только теоретическую, но и большую практическую значимость. Во многих статьях дана оценка рыбохозяйственной ценности Онежского озера, крупных водохранилищ и малых озер Карелии. Все его работы широко цитируются и используются для анализа гидроэкологических данных и понимания реакции водной биоты на климатические изменения и антропогенное воздействие. Андрей Павлович был постоянным участником экспедиций, организуемых в



ИВПС КарНЦ РАН – на Онежском и Ладожском озерах, Выгозерском водохранилище, Белом море, малых водоемах Карелии. Мы все помним, как пригодился огромный опыт Андрея Павловича в проведении экспедиционных исследований в процессе реализации российско-швейцарского проекта «Lake Ladoga: life under ice». Пробы воды, донных отложений, биоты, отобранные с его помощью в лагере на льду, послужили затем ценным материалом для написания важнейших статей о влиянии климата на великие озера мира.

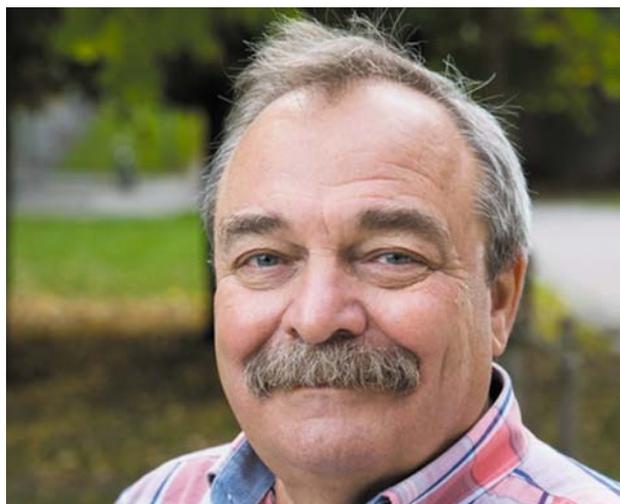
Андрей Павлович много лет был руководителем профсоюзной организации ИВПС КарНЦ РАН. Большой специалист и практик в области ихтиологии, добрый человек – таким мы все будем помнить Андрея Павловича Георгиева и хранить в своих сердцах огромную благодарность ему, к сожалению, так рано ушедшему из жизни.

*Сотрудники Института
водных проблем Севера КарНЦ РАН*

ПАМЯТИ ОЛЕГА ПАВЛОВИЧА САВЧУКА (1948–2023)

15 августа 2023 г. не стало старшего научного сотрудника ИВПС КарНЦ РАН, заведующего лабораторией Санкт-Петербургского отделения Государственного океанографического института Олега Павловича Савчука. Он оставил о себе добрую память, являясь идеологом, консультантом и непосредственным исполнителем работ в этих институтах в области математического моделирования морских и озерных экосистем.

О. П. Савчук родился 9 ноября 1948 г. в Ленинграде. Окончил здесь среднюю школу и в 1966 г. поступил на дневное отделение географического факультета ЛГУ им. Жданова на кафедру океанологии. Еще во время обучения в университете проявлял серьезный интерес к науке, читал много специальной литературы по океанологии, особенно интересовался изучением экосистем, занимался английским языком. После окончания ЛГУ в 1971 г. работал в должности инженера в Научно-исследовательском географо-экономическом институте при ЛГУ, с декабря 1971 по 25 июня 1975 г. учился в аспирантуре географического факультета ЛГУ. Затем продолжил работать в том же институте под руководством д. г. н. Ю. Н. Сергеева в должности старшего инженера, а с 1978 г. младшим научным сотрудником. В 1977 г. защитил в ЛГУ кандидатскую диссертацию «Математическое моделирование динамики азота в море». В 1980 г. перешел по конкурсу на должность старшего научного сотрудника в Ленинградское отделение Государственного океанографического института (ЛО ГОИН). С 1987 г. был назначен заведующим Лабораторией проблем Балтийского моря. В 1981–1999 гг. О. П. Савчук – заместитель научного координатора Российского национального проекта «Балтика», в котором трудился над исследованием эвтрофикации – одной из ключевых проблем Балтийского моря. Он всегда очень ответственно относился к тому, чем занимался. Олег Павлович был не только



признанным специалистом по моделированию морских биогеохимических циклов, он старался досконально разобраться во всем, что делал: отбирал пробы в экспедициях на судах, обрабатывал первичные данные, участвовал в создании баз данных. В сложные 90-е годы он стал принимать участие с докладами в международных конференциях по Балтийскому морю, активно работал в проекте «Балтийский Университет». В 2000-х годах в период реализации международного проекта РГГМУ «Балтийский Плавающий Университет», осуществляемого при поддержке МОК-ЮНЕСКО, Олег Павлович увлеченно читал лекции об эвтрофикации Балтийского моря. Как высококвалифицированный специалист по биогеохимии морских систем в начале 90-х годов был приглашен в Стокгольмский университет, где работал в группе профессора Фредрика Вульфа сначала в департаменте системной экологии, а затем в Институте Baltic Nest Стокгольмского университета над созданием математической модели экосистемы Балтийского моря. Он участвовал в разработке нескольких моделей: долгосрочной крупномасштабной модели эвтрофикации

Балтийского моря BALTSEM (the Baltic Sea Long-Term Large-Scale Eutrophication Model) под руководством проф. Ф. Вульфа; Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM (St. Petersburg Baltic Eutrophication Model) совместно с коллегами из СПбФ ИО РАН и РГГМУ; Санкт-Петербургской модели экосистемы озера SPLEM (St. Petersburg Lake Ecosystem Model) совместно с коллегами из СПбФ ИО РАН и ИВПС КарНЦ РАН. Эти модели успешно реализованы в рамках ряда проектов и теперь используются в системе поддержки принятия решений, которая была разработана в рамках шведской программы по морским исследованиям эвтрофикации MARE (Marine Research on Eutrophication) и развивается далее в Институте Baltic Nest Центра Балтийского моря Стокгольмского университета. В этих исследованиях О. П. Савчук тесно сотрудничал с Бо Густафссоном.

Олег Павлович никогда не терял связь с родиной, продолжая работать с 1990 г. на должности в ЛО ГОИН (затем в СПО ГОИН); на кафедре океанологии СПбГУ блестяще читал лекции «Математическое моделирование морских экосистем» и «Гидрометеорологические основы охраны окружающей среды» в качестве старшего преподавателя, а потом доцента. Разработанная при участии О. П. Савчука программа MARE-NEST впоследствии была включена в учебную дисциплину «Теория моделирования экосистем» океанологического факультета РГГМУ. Олег Павлович работал с ИВПС КарНЦ РАН, СПб ИО РАН, РГГМУ по международным проектам, таким как ИНКО-Коперникус по Белому морю, по совершенствованию Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM; по грантам РФФИ по созданию 3D-моделей экосистем Ладожского и Онеж-

ского озер и по разработке информационно-аналитической системы «озеро-водосбор» как метода фундаментальных исследований и инструмента обоснования управленческих решений. Созданная им модель сопряженных круговоротов азота и фосфора успешно использована для тридцатилетнего «биогеохимического реанализа» экосистемы Онежского озера. Круг его знаний был очень широк: океанология, гидрология, эвтрофикация, круговорот биогенов, качество вод, водная биогеохимия, экосистемы, морская химия, моделирование экосистем, водные экосистемы, экогидрология и др. В течение последних 50 лет он занимался разработкой и внедрением имитационных моделей для экосистем Северного, Балтийского, Баренцева и Белого морей, а также с 2018 по 2023 г. – для Ладожского и Онежского озер. Приглашался как авторитетный рецензент в ряд высокорейтинговых журналов. Как отметил Бо Густафссон в своем письме памяти О. П. Савчука, «..он был настоящим пионером в моделировании Балтийского моря, и без его вклада не было бы схемы снижения содержания питательных веществ в Плане Действий по Балтийскому морю...». О. П. Савчук – автор более 170 научных высокорейтинговых публикаций, соавтор нескольких монографий, посвященных Балтийскому и Белому морям, озерам. Олег Павлович отличался широкой эрудицией, высокой трудоспособностью, критическим мышлением и неиссякаемым оптимизмом, пользовался большим авторитетом среди коллег в России и других странах. Он навсегда остается в наших сердцах.

*Н. Н. Филатов, Т. Р. Еремина, Е. А. Захарчук,
А. В. Исаев, В. А. Рябченко, А. В. Соколов.
Фото Никласа Бьёрлинга*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, утраты науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил её оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются электронная версия статьи, которую авторы вычитывают и заверяют.

Журнал имеет систему электронной редакции на базе Open Journal System (OJS), позволяющую вести представление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронном формате и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Содержание выпусков Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные версии статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word в систему электронной редакции на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо высылаются на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

Для публикации в выпусках серии «Математическое моделирование и информационные технологии» рукописи принимаются в формате .tex (LaTeX 2ε) с использованием стилевого файла, который находится по адресу <http://transactions.krc.karelia.ru/section.php?id=755>.

Обязательные элементы рукописи располагаются в следующем порядке:

УДК курсивом в левом верхнем углу первой страницы; заглавие статьи на русском языке полужирным шрифтом; инициалы и фамилии авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название и полный почтовый адрес организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов аффилированным организациям; следует отметить звездочкой автора, ответственного за переписку, и указать в аффилиации его электронный адрес); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; указание источников финансирования выполненных исследований на русском языке.

Далее располагаются все вышеуказанные элементы на английском языке.

Текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности; списки литературы на языке оригинала (**Литература**) и на английском языке (**References**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; можно указать телефон для контакта редакции с авторами статьи.

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать ее содержание и состоять из 8–10 значащих слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (как правило, не менее пяти). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце точка не ставится.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. На табличный и иллюстративный материал следует ссылаться так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т.д.), фотографии, помещаемые на вкладышах (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо первым словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации.

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы могут быть снабжены указанием желательного размера рисунка, пожеланиями и требованиями к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные 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 мелкомасштабной картой, 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^{1*}, О. В. Балан¹, В. А. Корнева², И. Е. Малышева¹

¹Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *topchieva@ya.ru

²Петрозаводский государственный университет (просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: артериальная гипертензия; оксид азота; индуцибельная синтаза оксида азота; ангиотензинпревращающий фермент; инсерционно-делеционный полиморфизм гена ACE; альдостеронсинтаза; ген CYP11B2

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0218-2019-0077).

L. V. Topchieva^{1*}, O. V. Balan¹, V. A. Korneva², I. E. Malysheva¹. THE NITRIC OXIDE LEVEL IN THE BLOOD OF HEALTHY PEOPLE AND PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION CARRYING DIFFERENT ALLELE VARIANTS OF THE ACE (RS4340) AND CYP11B2 (RS1799998) GENES

¹Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *topchieva@ya.ru

²Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

Аннотация на английском языке

Keywords: arterial hypertension; nitric oxide; inducible nitric oxide synthase; angiotensin-converting enzyme; insertion-deletion polymorphism of ACE genes; aldosterone synthase; CYP11B2 gene

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (0218-2019-0077).

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм ² Chloroplast cross-sectional area, μm ²	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм ² Mitochondria cross-sectional area, μm ²	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм ² Peroxisome cross-sectional area, μm ²	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // Entomologica Fennica. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

References:

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews*. 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

Литература:

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)*. Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Литература:

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

Литература:

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

References:

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

Литература:

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

References:

Grebenshchikov Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

Ссылки на интернет-ресурсы

Литература:

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
No. 6, 2023
“LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY” Series

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

A. Yu. Terzhevik, N. I. Palshin, T. V. Efremova, S. R. Bogdanov, S. D. Golosov, I. S. Zverev, S. Yu. Volkov, A. V. Mitrokhov, S. I. Smirnov, R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova. RESEARCH BY HYDROPHYSICS LABORATORY OF NWPI KarRC RAS IN 1991–2022	5
--	---

Yu. S. Novikova, P. A. Ryazantsev, Yu. A. Dvornikov, N. V. Dvoeglazova, A. V. Tolstikov, M. N. Ignatieva. SURVEY OF ICE-COVER STRUCTURE AND SEDIMENT PARAMETERS OF LAKE IMANDRA BY GROUND-PENETRATING RADAR	23
---	----

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

M. B. Zobkov, N. M. Kalinkina, V. V. Kovalevski, A. V. Bagaev, N. A. Belkina, N. V. Kulik, M. V. Zobkova, T. A. Efremova, N. E. Galakhina, N. A. Efremenko. RESULTS OF INTERDISCIPLINARY STUDIES OF THE CONTAMINATION OF LAKE ONEGOWATER AREA BY MICROPLASTIC PARTICLES	32
---	----

K. V. Titova, N. M. Kokryatskaya, S. S. Popov, O. Yu. Moreva, A. V. Bragin. STUDYING THE PROCESS OF SULFATE REDUCTION IN THE WATER OF LAKES IN THE KENOZERSKY NATIONAL PARK	53
---	----

G. T. Frumin, E. S. Negodina. REGIONAL MAXIMUM PERMISSIBLE CONCENTRATIONS OF METALS IN LAKE PSKOVSKOYE	66
--	----

HYDROBIOLOGY

T. Yu. Gazizova, A. G. Rusanov, T. V. Sapelko. THE SIMILARITY ASSESSMENT OF THE MACROPHYTE SPECIES COMPOSITION BETWEEN MODERN AQUATIC VEGETATION AND SUBRECENT POLLEN SPECTRA OF SMALL LAKES ON THE VALAAM ISLAND (LAKE LADOGA)	73
---	----

D. S. Dudakova, M. D. Petukhova, A. D. Starukhina. FEATURES OF DIEL MIGRATIONS OF <i>GMELINOIDES FASCIATUS</i> (STEBBING, 1899) AMPHIPODS IN THE LITTORAL ZONE OF THE LAKE LADOGA SKERRIES REGION	84
---	----

O. V. Morozova. ASSESSMENT OF THE KAZANKA RIVER MOUTH WATER QUALITY BY MICROBIOLOGICAL INDICATORS	97
---	----

G. A. Shcheglov. THE POSSIBILITY OF USING <i>CHLORELLA</i> ALGAE TO REDUCE THE MINING INDUSTRY LOAD ON A KARELIAN LAKE-RIVER SYSTEM	107
---	-----

HISTORY OF SCIENCE

N. N. Filatov. SCIENCE-BASED ACTIVITIES OF THE REPUBLIC OF KARELIA BRANCH OF THE RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY	117
---	-----

CHRONICLE

Z. I. Slukovskii, V. A. Tolstikov, D. B. Denisov, N. E. Galakhina, S. I. Vokueva. Polar Limnologists School continues 134

N. E. Galakhina. 7th International Conference of Young Scientists “Water Resources: Research and Management” (All-Russian Limnological Hands-on School) (Petrozavodsk, September 4-8, 2023) 138

BEREAVEMENTS

In memory of Arkadiy Yu. Terzhevik (1948–2023) 143

In memory of Aleksandr V. Litvinenko (1954–2023) 145

In memory of Andrey P. Georgiev (1978–2023) 148

In memory of Oleg P. Savchuk (1948–2023) 149

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 151

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 6, 2023

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 8 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Л. Э. Бюркланд

Подписано в печать 24.10.2023. Дата выхода 31.10.2023. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 17,1. Усл. печ. л. 18,5.
Тираж 100 экз. Заказ 789. 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