

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»



ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 5, 2024

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2024

Главный редактор

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

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии «Лимнология и океанология»

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

Издается с января 2009 г.

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

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. 5, 2024

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY

Petrozavodsk
2024

Editor-in-Chief

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

Editorial Council

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

Editorial Board of the Limnology and Oceanology Series

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

Published since January 2009

8 issues a year

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

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

E-mail: trudy@krc.karelia.ru

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

УДК 556.555

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЛЬЕФА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОЗЕР ВОДОСБОРА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Н. Ю. Корнеенкова*, М. А. Науменко

Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9,
Санкт-Петербург, Россия, 196105), *ntkorn87@gmail.com

Обширный водосбор крупнейшего европейского озера – Ладожского – занимает второе место по площади в России после водосбора озера Байкал. Он характеризуется многообразием типов подстилающей поверхности и сложной гидрографической сетью, представляющей ледниковые и водно-ледниковые формы рельефа. Впервые проведенный комплексный геоморфометрический анализ рельефа водосбора Ладожского озера с уточнением количества и размеров озер по высотной структуре водосбора выявил характерные особенности их распределения на основе цифровой модели и подтвердил различия между выбранными интервалами высот водосбора. Рассчитанное суммарное количество озер Ладожского водосбора составляет около 21 400 без учета водоемов менее 0,01 км². Проведена новая оценка озерности территории водосбора по диапазонам высот, показано, что озерность уменьшается с высотой водосбора. Наибольшее количество озер расположено на высотах от 75 до 200 м и составляет около 77 % от общего количества озер площадью более 0,01 км². Медианные значения площадей для каждого диапазона высот Ладожского водосбора колеблются от 0,04 до 0,06 км². Большую часть, от 59 до 100 % общего количества озер для выбранных диапазонов высот, на водосборе составляют небольшие озера с площадью до 0,3 км². Профильная кривизна рельефа объективно указывает на преобладание процессов денудации над процессами аккумуляции на высотах более 250 м. Приводится первая оценка объема чаши водосбора Ладожского озера.

Ключевые слова: водосбор Ладожского озера; цифровая модель рельефа; ГИС; морфометрические характеристики; озера; объем чаши водосбора

Для цитирования: Корнеенкова Н. Ю., Науменко М. А. Морфометрические особенности рельефа и распределение озер водосбора Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 5–17. doi: 10.17076/lim1923

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

N. Yu. Korneenkova*, M. A. Naumenko. MORPHOMETRIC FEATURES OF THE RELIEF AND DISTRIBUTION OF LAKES IN LAKE LADOGA CATCHMENT

*Institute of Limnology, St. Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences (9 Sevast'yanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *ntkorn87@gmail.com*

The vast catchment area of the largest European lake – Lake Ladoga, is the second largest in Russia after that of Lake Baikal. It is characterized by a variety of underlying surface types and a complex hydrographic network representing glacial and aqueo-glacial relief forms. A comprehensive geomorphometric analysis of the relief in Ladoga Lake catchment, specifying the number and sizes of lakes in different elevation belts, revealed for the first time the characteristic features of their distribution based on a digital model and confirmed the differences between the selected catchment elevation intervals. The total number of lakes in the Ladoga catchment was estimated at about 21 400, excluding water bodies smaller than 0.01 km². The percentage covers of lakes by elevation ranges were re-estimated, showing their decrease towards higher elevations. The greatest number of lakes is found at elevations between 75 and 200 m, accounting for about 77 % of the total number of lakes larger than 0.01 km². Median lake sizes vary among elevation ranges of the Ladoga catchment from 0.04 to 0.06 km². A majority of lakes in the selected elevation ranges, 59 to 100 % of the total number, are small lakes up to 0.3 km². The relief profile curvature is an objective indicator that denudation processes prevail over accumulation processes at elevations higher than 250 m. A first estimate of the volume of the basin of the Lake Ladoga catchment is given.

Keywords: Lake Ladoga catchment; digital elevation model; GIS; morphometric characteristics; lakes; catchment basin volume

For citation: Korneenkova N. Yu., Naumenko M. A. Morphometric features of the relief and distribution of lakes in Lake Ladoga catchment. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 5–17. doi: 10.17076/lim1923

Funding. The work was carried out under state assignment within theme No. FFZF-2024-0001 “Ecosystems of Lake Ladoga, water bodies in its catchment and adjacent territories under natural and anthropogenic impacts in the context of climate change”.

Введение

Рельеф является главным фактором перераспределения тепла и влаги на водосборной территории в определенном климатическом поясе, и как следствие, к нему приспосабливается биота, от него зависит характер почвообразующих процессов. Дистанционные методы, позволяющие получить новые данные с высоким пространственным разрешением о рельефе поверхности Земли, и интенсивно развивающиеся методы анализа, моделирования и картографического изображения морфометрических параметров рельефа [Симонов, 1998; Шварев и др., 2022] предоставляют новые возможности для количественного изучения структуры речных бассейнов и водосборных территорий крупных озер [Florinsky, 2016; Иванов, Ермолаев, 2017; Опекунова, Бардаш, 2022]. Рельеф, как один из главных системообразующих компонентов ландшафта, может быть принят в качестве входного параметра в математической и математико-картографической модели геосистем водосборов [Кошкарев, 2015]. Качество озерной воды непосредственно зависит от гидрологических,

гидрохимических и гидробиологических процессов на их водосборах, озеро и его водосбор – это единая природная система, процессы в которой оказывают взаимное влияние друг на друга [Драбкова, Сорокин, 1979; Håkanson, 2005; Sánchez Schacht et al., 2023].

Обширный водосбор крупнейшего в Европе Ладожского озера характеризуется многообразием типов подстилающей поверхности и сложной гидрографической сетью, представляющей хорошую сохранность ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа [Румянцев и др., 2015]. Водосбор насыщен большим количеством озер и болот. Озера оказывают регулирующее влияние на сток наносов, осаждая их в своей толще вследствие замедленного водообмена. Несмотря на относительно небольшую среднюю высоту (114 м) и амплитуду высот на водосборе Ладожского озера (до 390 м), морфология рельефа довольно разнообразна [Лукашов, 2000; Ладожское..., 2015]. Самый низкий уровень имеет замыкающее Ладожское озеро с отметкой 5,1 м над уровнем моря Балтийской системы высот (БС).

Главными особенностями гидрографической сети водосбора в пределах Карелии,

сегмента Балтийского кристаллического щита, являются геологическая молодость сети, неглубокое залегание кристаллических пород и малая мощность рыхлых четвертичных отложений [Озера..., 2013]. Комплексная характеристика водной сети Карелии приводится в статье А. В. Литвиненко [2024]. Образование различных типов четвертичных отложений зависело от условий осадконакопления, а также от состава и рельефа коренных пород [Шелехова, 2014]. Южная часть водосбора отличается от северной тем, что находится на Русской осадочной плите и имеет преимущественно плоский, холмисто-равнинный рельеф по сравнению с резко расчлененным, контрастным рельефом северной части бассейна Ладожского озера.

Количественная характеристика особенностей рельефа водосборной территории Ладожского озера представляется актуальной не только с фундаментальных географических позиций, но и с практической точки зрения, имея в виду активную

хозяйственную деятельность и, следовательно, антропогенные изменения окружающей среды.

Границы водосборной территории крупнейшего европейского озера – Ладожского – определены еще в 1874 году И. А. Стрельбицким, как сообщает И. В. Молчанов [1945], затем они уточнялись и корректировались различными организациями по картам различного масштаба и детальности. Общая площадь вместе с площадями озер и границы водосбора, полученные в разное время, приведены в книге И. В. Молчанова [1945]. Отличия между максимальными и минимальными рассчитанными площадями водосбора Ладожского озера не превышают 3%. Так, по расчетам Стрельбицкого, площадь водосбора составляет 284 829 км², а по данным Волховстроя и Сясьстроя – 276 164 км². В 2003 г. создана первая цифровая модель водосбора Ладожского озера с пространственным разрешением 1×1 км на основе данных спутниковой альтиметрии [Науменко и др., 2003] (рис. 1, I).

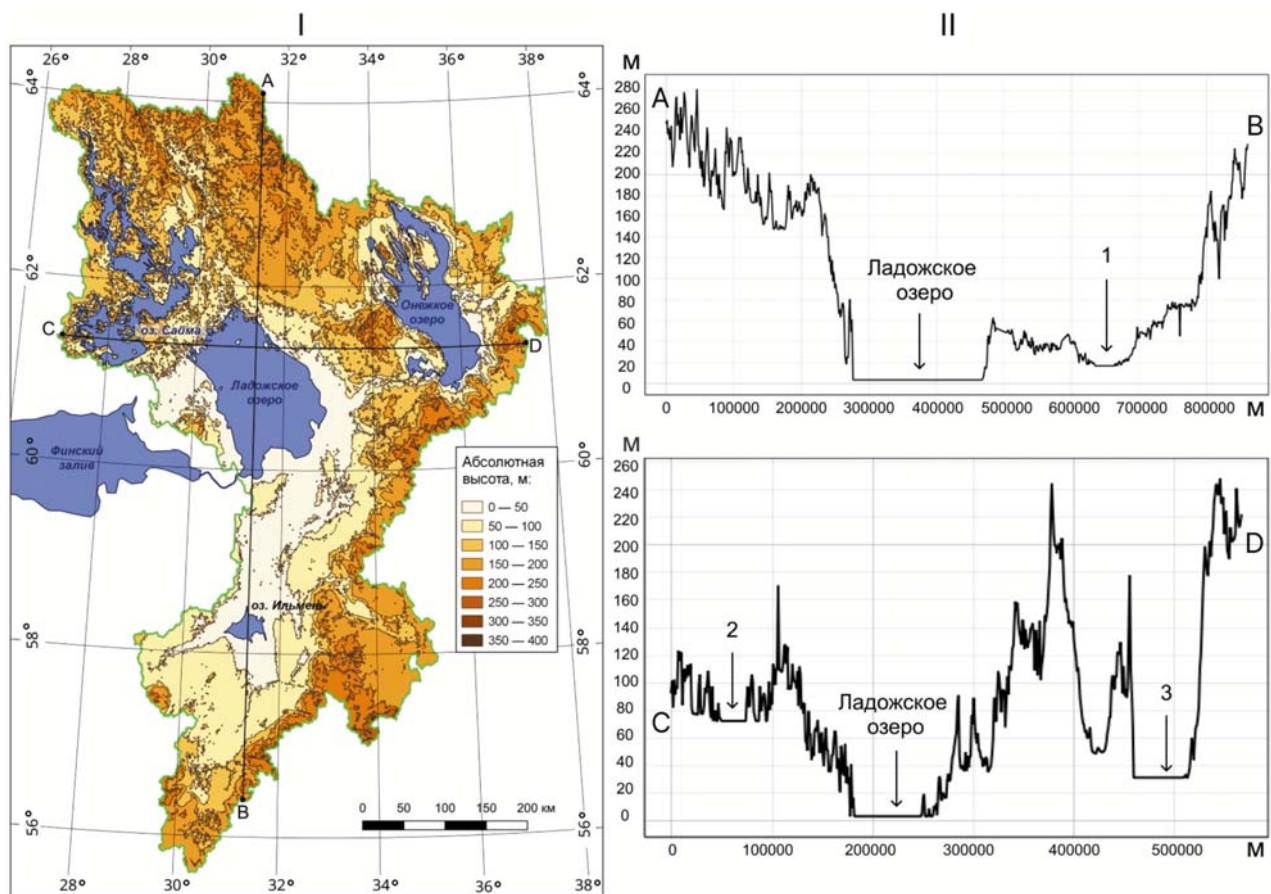


Рис. 1. Водосбор Ладожского озера, полученный на основе цифровой модели (I), профили высот по меридиональному и широтному направлению (II):

1 – оз. Ильмень, 2 – оз. Сайма, 3 – Онежское оз.

Fig. 1. Catchment area of Lake Ladoga obtained from the digital elevation model (I), elevation profiles along meridional and latitudinal directions (II):

1 – Lake Ilmen, 2 – Lake Saima, 3 – Lake Onego

Была определена площадь водосбора – 282 664 км², которая фактически не отличалась от сделанных ранее оценок и практически совпадает с официальными данными – 282 700 км² [Ресурсы..., 1972]. Цифровая модель позволила определить не только относительные площади четырех частных водосборов: собственно Ладожского (17,1 %), Онежско-Свирского (29,1 %), Ильмень-Волховского (29,1 %) и Сайма-Вуоксинского (24,7 %), но и построить гистограммы их высот и уклонов [Науменко, Каретников, 2005]. Были рассчитаны базовые статистические морфометрические характеристики водосборов, построены и проанализированы их пространственные корреляционные функции.

Описание водосбора приводится в работах [Ладога..., 2013; Измайлова, Корнеева, 2021; Измайлова, Науменко, 2021]. Водосбор Ладожского озера по площади занимает второе место в России после водосбора озера Байкал. На водосборе Ладожского озера расположено более 50 000 озер [Ладожское..., 2002], в том числе три крупных, а именно: Онежское (общая площадь 9943 км², высота БС – 33 м), оз. Ильмень (площадь ~ 950 км², высота БС – 18,1 м), оз. Сайма (площадь 4380 км², высота БС – 76 м). На рис. 1 показаны разрезы высот водосбора с севера на юг и с запада на восток.

Водосбор озера представляет собой своеобразную «чашу», верхней границей которой является водораздельная линия, а нижней – собственно акватория озера. Цель настоящей статьи заключается в выявлении количественных особенностей характеристик рельефа и распределения озер по ступеням (диапазнам) высот на основе геоморфометрического анализа цифровой модели высот водосбора Ладожского озера, что необходимо при моделировании внешней нагрузки на водоемы [Кондратьев и др., 2006; Кондратьев, 2007].

Исходные данные и методика

Исходной информацией для анализа особенностей распределения высот и характеристик озер Ладожского водосбора послужила цифровая модель высот рельефа глобального охвата FABDEM (Forest And Buildings remove Copernicus DEM) с пространственным разрешением в 1 угловую секунду (примерно 30 м на экваторе). В основе набора данных лежит цифровая модель поверхности Copernicus GLO 30. При разработке модели рельефа FABDEM был применен алгоритм коррекции погрешностей, обусловленных учетом моделью Copernicus GLO 30 объектов, находящихся на земной поверхности, – лесных массивов,

зданий и др. Цифровая модель разработана исследователями из Бристольского университета и компании Fathom и размещена в свободном доступе для некоммерческого использования на сайте этой компании [Fathom's...]. Так как модель рельефа FABDEM изначально поставляется в системе координат WGS 84, для дальнейшего исследования было произведено перепроецирование растрового изображения в Универсальную поперечную проекцию Меркатора (UTM).

Построение границ водосбора Ладожского озера осуществлялось по данным модели рельефа, разработанной в ИНОЗ РАН [Ладожское..., 2015] (западная часть водосбора), а также открытой базы гидрографических данных HydroSHEDS [Lehner et al., 2008] (южная, восточная, северная части водосбора).

Для того чтобы избежать влияния различных шумов и погрешностей исходных данных, модель высот была конвертирована в растр с разрешением 1 км для расчета статистических параметров высот и крутизны склонов (в градусах). Комплекс расчетов статистических параметров распределения площадей озер, уклонов и высот в границах водосбора Ладожского озера производился в среде ПО SAGA GIS [SAGA...] и QGIS.

В рамках исследования цифровая модель рельефа была переклассифицирована в бинарные растры, в каждом из которых значениям высот определенного диапазона присваивалось значение 1, а остальным значениям – 0. В исследовании рассмотрены диапазоны высот 0–50, 50–100, 100–150, 150–200, 200–250, 250–300, 300–350 и более 400 м. Полученные растровые данные преобразованы в векторный формат.

Чтобы рассчитать показатели высот и уклонов с использованием модуля Grid Values to Points в SAGA ГИС на основе цифровой модели рельефа и растра крутизны склонов, были построены точечные векторные слои, содержащие в таблице атрибутов значения высот или уклонов соответственно и координаты центров каждого пикселя. Расчет количества и площадей водоемов Ладожского водосбора выполнен на основе массива данных о водной поверхности Global Surface Water Seasonality (GSWSeasonality) [Pekel et al., 2016]. Массив GSWSeasonality представляет собой наборы индексированных растровых изображений, содержащих сведения о количестве месяцев в году, в которые в каждом пикселе дешифрирована водная поверхность. Для расчета количества водоемов территории водосбора и их площадей использована автоматизированная

обработка массива GSWSeasonality. Выполнено перепроецирование векторного слоя в прямоугольную систему координат и удаление пикселей, соответствующих речной сети. С использованием инструмента «Базовая статистика» в ГИС QGIS получены статистические показатели площадей водоемов водосбора для каждого диапазона высот. В рамках указанных вычислений получены площадные характеристики более 56 000 водоемов. Однако в связи с погрешностями при измерении площадей и количества объектов с учетом их сезонности [Расулова, 2022] по снимкам среднего пространственного разрешения, на которых основан массив GSWSeasonality, рассчитанное в настоящем исследовании количество водоемов менее 0,01 км² на водосборе Ладожского озера следует считать завышенным. Для более точного учета водоемов с площадями менее 0,01 км² по данным GSWSeasonality необходимо проведение дополнительных исследований с применением визуально-инструментального дешифрирования.

Результаты и обсуждение

Цифровая модель рельефа водосбора Ладожского озера позволила оценить изменение площади и объема чаши водосбора в зависимости от изменения высоты от уровня Ладожского озера до максимальной высоты водораздельной линии (рис. 2). Это первая оценка объема ледника, соответствующего стадии деградации ледникового покрова, когда территории, окружающие водосбор Ладожского озера, уже освободились от льда, но вся чаша водосбора была еще заполнена льдом. Эта величина может служить реперным значением при оценках эволюции ледникового покрытия водосбора. Минимальный объем и площадь при наименьших высотах водосбора отсчитывается от суммарного объема котловины Ладожского и Онежского озер [Науменко, 2013; Науменко, 2020]. Таким образом, общий объем чаши водосбора Ладожского озера составляет 48 732 км³, что примерно в 43 раза больше суммарного объема Ладожского, Онежского озер и озера Ильмень.

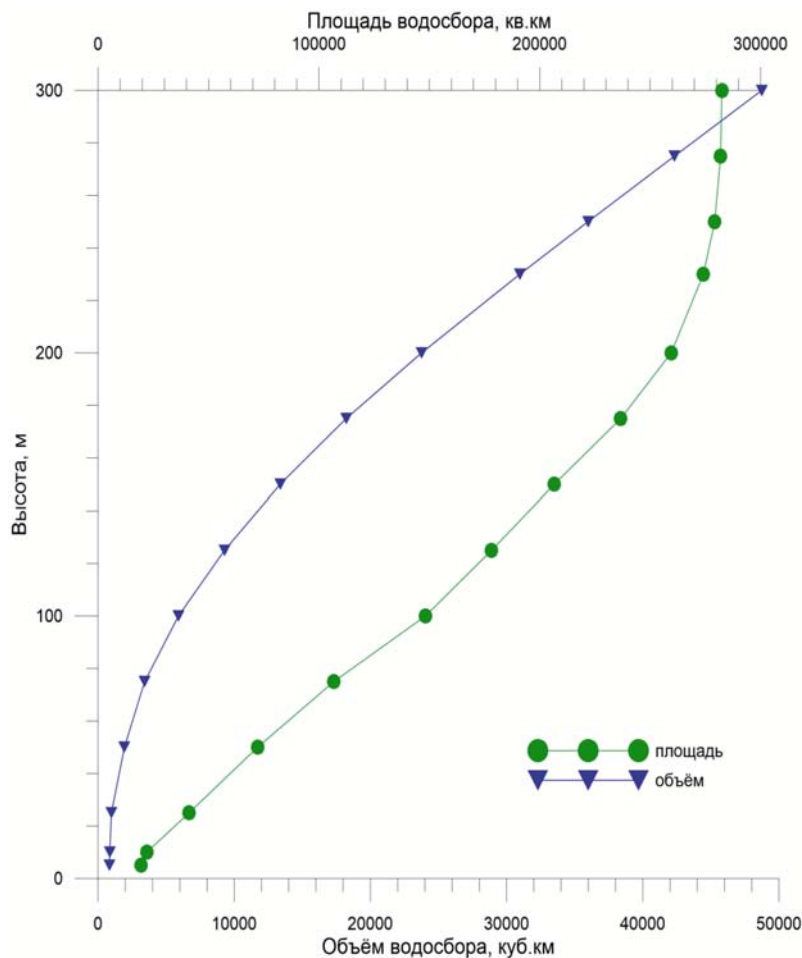


Рис. 2. Изменение площади и объема водосбора с высотой
 Fig. 2. Change in the catchment area and volume with height

На рис. 3 приведены объединенные гистограммы высот водосбора и средних высот уреза воды озер по пятидесятиметровым диапазонам высот, что позволяет определить наиболее вероятные высоты водосбора Ладожского озера, где расположены озера, и их относительное количество. С очевидностью и статистической достоверностью подтверждаются различия между выбранными интервалами высот водосбора (табл.) на основе их вычисленных статистических характеристик. В самой нижней части водосбора на высотах до 50 метров расположены самые крупные озера водосбора: Ладожское, Онежское и Ильмень (рис. 1). В диапазоне 50–100 м расположены озера Сайменской системы и само озеро Сайма, площадь этого интервала высот самая большая на водосборе.

Для характеристики морфометрических особенностей распределения высот водосбора Ладожского озера необходимо оценить расчлененность рельефа и уклоны поверхности, отражающие степень выположенности рельефа как результат аккумулятивно-денудационной переработки.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) характеризует степень вертикальной расчле-

ненности рельефа и, как следует из таблицы, не сильно отличается между различными диапазонами высот, хотя по критерию Фишера эти отличия значимы.

С диапазона высот 50–100 м начинается закономерное увеличение уклонов и СКО последующих диапазонов высот, причем уклоны самого верхнего диапазона высот 350–400 м превышают уклоны самого низшего диапазона высот почти в 6 раз. Наиболее крутые и изменчивые склоны располагаются по водораздельной линии Ладожского водосбора.

Рассчитанное суммарное количество озер Ладожского водосбора составляет около 21 400 без учета водоемов площадью менее 1 га. Количество озер с первого до третьего диапазона высот увеличивается, достигая максимума на высотах 100–150 м, этот диапазон примерно поровну представлен в северной и южной частях водосбора. Наибольшее количество озер, как следует из рис. 4 и таблицы, расположено на высотах от 75 до 200 м и составляет около 77 % от общего количества озер с площадью более 1 га. С увеличением высоты Ладожского водосбора начиная с диапазона 100–150 м количество озер уменьшается.

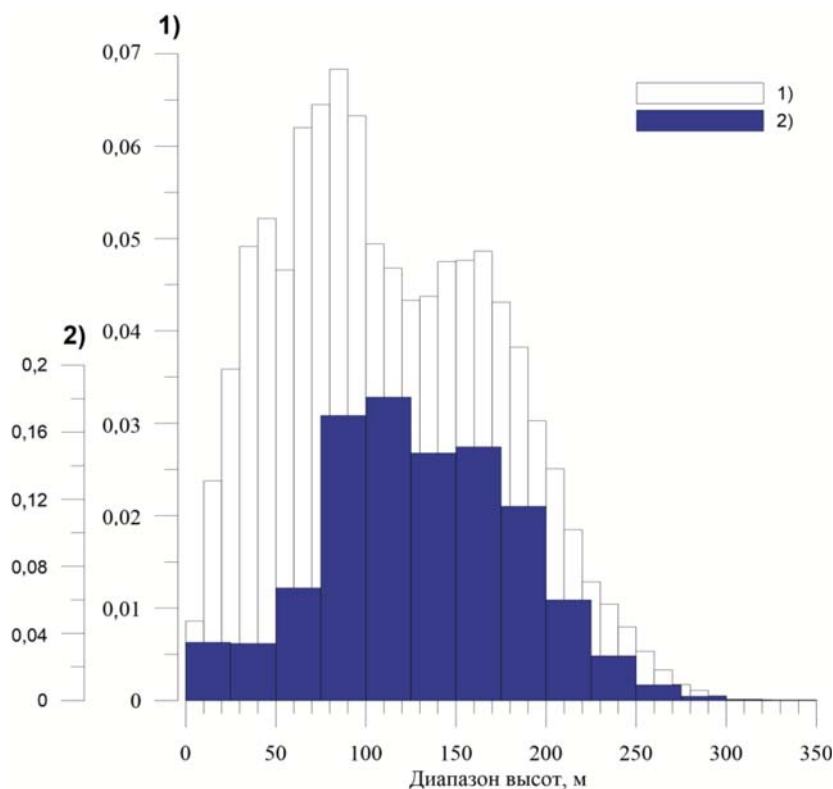


Рис. 3. Гистограммы высот общего водосбора (1) и средних высот уреза воды озер (2) по пятидесятиметровым диапазонам высот

Fig. 3. Total catchment elevations (1) and average elevations of lake's level (2) histograms by 50-meter elevation ranges

Статистические характеристики водосбора Ладожского озера
 Statistical characteristics of the Ladoga Lake catchment

Диапазон высот, м Elevation range, m	Водосбор Ладожского озера с учетом крупных водоемов Catchment of Lake Ladoga including large reservoirs					Озера водосбора с площадью более 0,01 км ² Catchment lakes with areas greater than 0.01 km ²						
	Площадь территории, км ² (%) Territory area, km ² (%)	Средняя высота, м н.у.м. Average height, m ASL	СКО, м Mean square deviation, m	Средний уклон, град. (*) Average slope, degrees (*)	СКО, град. Mean square deviation, degrees	Кол-во озер Lake number	Общая площадь озер, км ² Total lake area km ²	Средняя площадь озер, км ² Average lake area, km ²	Медиана, км ² Median, km ²	% озер с площадью ≤ 0,3 км ² % lake with a mirror area ≤ 0.3 km ²	СКО, км ² Mean square deviation, km ²	Озерность, % Lake percentage, %
0–50	70 780 (25,6)	32,6	12,03	0,22 (1)	0,23	1302	29 172,7	22,4	0,0598	61	554,35	41,2
50–100	76 912 (27,9)	77,6	13,96	0,32 (1,45)	0,31	5165	10 153,9	1,97	0,0587	59	29,85	13,2
100–150	54 357 (19,7)	123,5	15,08	0,49 (2,20)	0,38	7082	3344,5	0,47	0,0464	67	6,34	6,2
150–200	51 904 (18,8)	172,6	13,78	0,44 (1,97)	0,35	5818	2539,0	0,44	0,0502	63	3,52	4,9
200–250	19 068 (6,9)	220,1	13,5	0,55 (2,47)	0,37	1865	376,7	0,2	0,039	62	1,06	2,0
250–300	2897 (1,0)	264,0	11,38	0,66 (2,99)	0,47	175	27,8	0,16	0,0369	74	0,79	1,0
300–350	120 (0,04)	314,9	11,81	1,32 (5,93)	1,09	14	0,6	0,05	0,0364	100	0,04	0,5

Примечание. *Доли единицы от диапазона 0–50 м.

Note. *Fractions of a unit from range 0–50 m.

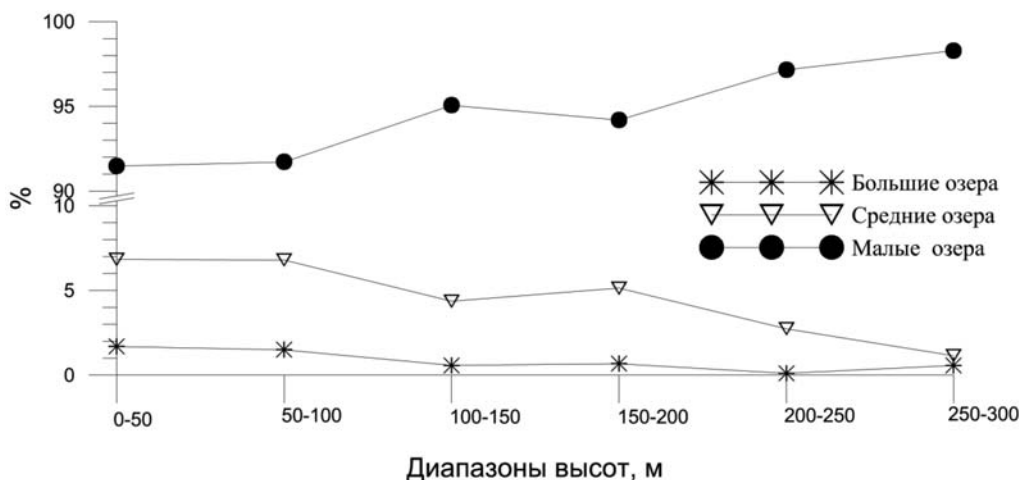


Рис. 4. Изменение количества озер по диапазонам высот водосбора

Fig. 4. Change in the number of lakes by catchment elevation ranges

Озера водосбора могут быть условно разделены на три группы: большие – с площадью не менее 10 км², средние – от 10 до 1 км² и малые – менее 1 км². Рис. 3 демонстрирует изменение количества трех классов озер в процентах от общего количества озер в выбранном диапазоне высот.

Наиболее крупные водоемы расположены в диапазоне высот до 50 м – Ладожское и Онежское озера, озеро Ильмень, Ивинский разлив, озера Вуокса и Отрадное. На абсолютных отметках от 50 до 100 м находятся такие крупные озера, как Сайма, Пиелинен, озера Сайменской системы Пихлайявеси, Оривеси, Хаукивеси, Пурувеси, Пюхяселькя и другие.

Количество больших и средних озер с высотой водосбора уменьшается с 1,7 и 6,8 % соответственно практически до нуля, а количество малых увеличивается с 91,5 до 98,3 % (рис. 4).

Медианные значения площадей для каждого диапазона высот Ладожского водосбора колеблются от 0,04 до 0,06 км². Большую часть общего количества озер (от 59 до 100 %) для выбранных диапазонов высот на водосборе занимают небольшие озера с площадью до 0,3 км², что определяется наличием множества заполненных водой тектонических нарушений и чрезвычайно расчлененным рельефом ледникового происхождения [Озера..., 2013].

Общая площадь водной поверхности озер водосбора Ладоги составляет примерно 18 400 км², а с учетом Ладожского и Онежского озер – 45 600 км². Общая озерность – отношение суммарной площади водной поверхности озер к общей площади водосбора, рассчитанная с учетом новых данных, равняется 16,5 %, что подтверждает опубликованные ранее данные [Озера..., 2013]. Следует заметить, что озерность меняется в зависимости от исследуемого диапазона высот (табл.). Наибольшую озерность имеет диапазон высот 0–50 м, с учетом площадей Ладожского и Онежского озер – 41,2 %. Следующий диапазон (50–100 м) характеризуется озерностью 13,2 %. С увеличением высот водосбора озерность снижается.

Морфология рельефа водосбора Ладожского озера во многом унаследована от предшествующих эпох плейстоцен-голоценовых трансгрессий и регрессий [Лукашов, 2000; Шелехова, 2014]. Экзогенные и эндогенные процессы по-разному влияют на геологические породы и осадки, образуя формы рельефа с различающимися морфометрическими параметрами. Отличаются углы склонов, относительные превышения, ориентировка и пространственное положение отдельных форм. Три морфологических параметра поверхности

(уклон, плановая и профильная кривизна) позволяют охарактеризовать разнообразные типы развития рельефа и объяснить условия их формирования [Бронгулеев, 2018]. С помощью цифровой модели высот водосбора впервые было рассчитано пространственное распределение двух важных параметров: плановой α и профильной кривизны β рельефа водосбора Ладожского озера. Формулы можно найти на сайте GIS-Lab [Основные...].

Горизонтальная (плановая) кривизна характеризует изменение направления линий тока воды в плане в каждом узле грида и является мерой кривизны контуров. Отрицательные значения горизонтальной кривизны соответствуют зонам дивергенции (выпуклые участки), т. е. расхождению линий тока, а положительные значения указывают на сходящийся поток (конвергенцию) и характеризуют вогнутые участки. Нулевые значения указывают на плоскую поверхность [Бронгулеев, 2018].

Вертикальная (профильная) кривизна определяет изменения уклона склона вниз или вверх в направлении градиента в каждом узле грида. Вычисления параметра подобны вычислениям второй производной. Отрицательные значения указывают на ускоренное течение воды по поверхности и денудацию. Положительные значения характеризуют замедление потока по поверхности и аккумуляцию.

Обобщенная характеристика водосбора Ладожского озера может быть представлена в виде гистограмм вычисленных параметров плановой α и профильной кривизны β рельефа по диапазонам выбранных интервалов высот. Вычислены коэффициенты асимметрии A_s и эксцесса E , которые характеризуют степень симметричности и островершинности функций распределения величин.

Гистограммы значений горизонтальной (плановой) кривизны α по выбранным диапазонам высот по виду практически совпадают друг с другом. При малом коэффициенте асимметрии $|A_s| < 0,66$ и отрицательном коэффициенте эксцесса E гистограммы представляют собой распределение равномерной плотности с одинаковой вероятностью появления каждого значения α , что характеризует собой прямой склон (рис. 5).

На рис. 6 показаны гистограммы значений вертикальной (профильной) кривизны β , которые кардинально отличаются от α . Для каждого диапазона высот водосбора гистограмма представляет высокую пикообразную кривую, ветви которой круто опускаются по оси ординат к оси абсцисс и затем резко переходят в шлейфы, причем положительная величина эксцесса E

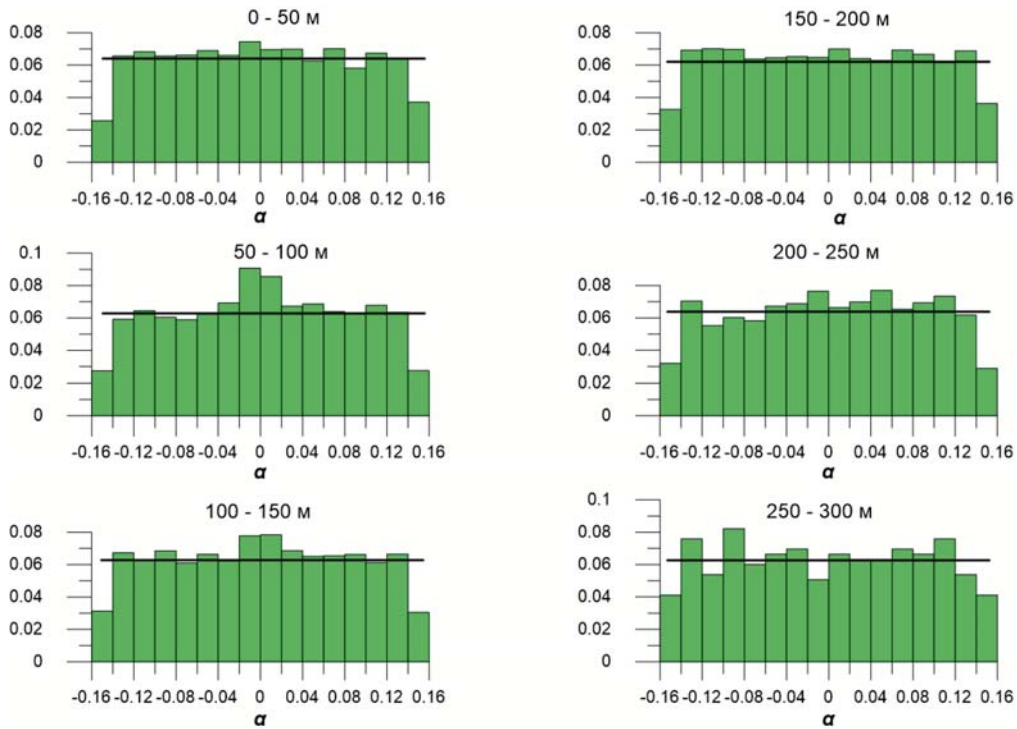


Рис. 5. Гистограммы плановой крутизны рельефа для диапазонов высот водосбора Ладожского озера

Fig. 5. Histograms of profile curvature of relief for elevation ranges of the Ladoga Lake catchment

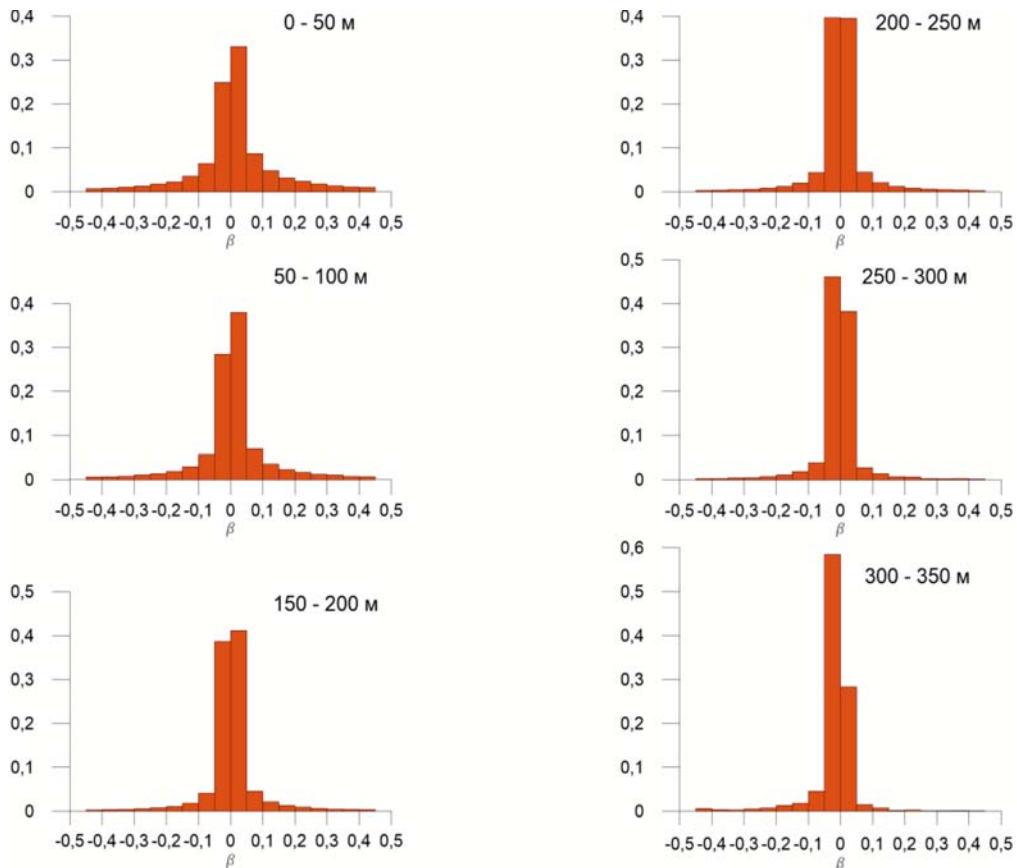


Рис. 6. Гистограммы профильной крутизны рельефа для диапазонов высот водосбора Ладожского озера

Fig. 6. Histograms of profile curvature of relief for elevation ranges of the Ladoga Lake catchment

возрастает с увеличением высоты водосбора. На гистограммах отчетливо проявляется эффект увеличения отрицательных значений β с увеличением высоты водосбора, что свидетельствует о преобладании денудации (процессов сноса и переноса пород в пониженные участки земной поверхности) с увеличением высоты в отличие от преобладания аккумуляции при положительных β на низких ступенях водосбора Ладожского озера. В диапазоне высот водосбора 200–250 м отмечается баланс между положительными и отрицательными значениями вертикальной (профильной) кривизны, что указывает на факт компенсации процессов аккумуляции процессами денудации.

Помимо вычисленных площадных и объемных параметров водосбора Ладожского озера и особенностей распределения озер и их количества параметры водораздельной линии являются важными морфометрическими характеристиками и могут служить основой для сравнения водосборных территорий озер, тем более что водораздельные линии в основном отражают черты «первоначального» рельефа, сохранившегося после освобождения из-под покрова льда [Науменко, 2020]. Максимальные высоты наблюдаются на северной и восточной окраинах водосбора (рис. 1). Средняя высота водораздельной линии (175,5 м) выше средней высоты общего водосбора (114,3 м) Ладожского озера в 1,5 раза. Ранее были определены длина водораздельной линии – 5764 км [Науменко и др., 2003], а также параметр изрезанности, равный отношению фактической длины линии к длине окружности, площадь которой равна площади водосбора. Этот параметр равен 3, что указывает на существование значительных пространственных нерегулярностей на границе водосбора. За характерный пространственный масштаб («ритм рельефа» [Спирidonов, 1952]) может быть принято среднее расстояние между ближайшим максимумом и минимумом высоты линии водосбора. Этот параметр равен $\sim 2,5$ км и характеризует минимальный квазипериодический масштаб колебаний высоты водосборной линии Ладожского озера. Необходимые дальнейшие исследования водосбора Ладожского озера будут базироваться на концепции Пузаченко и др. [2002], определяющей структуру рельефа как «систему вложенных друг в друга иерархических уровней», связанных нелинейными автоколебаниями.

Кинематические модели эволюции склона при действии внешних факторов (тектонических движений), разработанные В. В. Бронгулевым [2018], могут детализировать и интерпретировать морфометрические процессы

на водосборе Ладожского озера, особенно в северной его части, где подтверждены вертикальные скорости с максимумом интенсивности поднятия 10 мм/год за счет механизма упругого восстановления изостатического равновесия земной коры после снятия ледовой нагрузки в голоцене [Галаганов и др., 2011; Розенберг и др., 2022; Мельник и др., 2022].

Заключение

Подводя итог, можно констатировать, что использование цифровой модели рельефа водосбора Ладожского озера позволило провести комплексный морфометрический анализ рельефа с уточнением количества и размеров озер по высотно-поясной структуре водосбора и получить ранее не рассчитываемые параметры рельефа.

Суммарное количество озер Ладожского водосбора составляет около 21 400 (без учета водоемов площадью менее 0,01 км²). Наибольшее их количество расположено на высотах от 75 до 200 м. Большую часть водосбора для выбранных диапазонов высот занимают озера с площадью до 0,3 км².

Показано, что озерность водосбора меняется в зависимости от исследуемого диапазона высот. Наибольшую озерность имеет диапазон высот 0–50 м. С увеличением высот водосбора озерность снижается.

Выявлено преобладание денудации с увеличением высоты в отличие от преобладания аккумуляции на низких ступенях водосбора Ладожского озера. В диапазоне высот водосбора 200–250 м отмечается баланс между положительными и отрицательными значениями вертикальной (профильной) кривизны, что указывает на факт компенсации процессов аккумуляции процессами денудации.

Определен минимальный квазипериодический масштаб колебаний высоты водосборной линии Ладожского озера.

Результаты являются значимыми для строительства дорог, планирования и создания природных охраняемых территорий и сельскохозяйственных угодий и ирригации, а также для оценки рисков природопользования.

Литература

- Бронгулеев В. В. Математические методы в геоморфологии. Избранные работы. М.: Медиа-Пресс, 2018. 128 с.
- Галаганов О. Н., Горшков В. Л., Гусева Т. В., Розенберг Н. К., Передерин В. П., Щербакова Н. В.

Современные движения земной коры Ладожско-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. № 8(2). С. 130–136.

Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 196 с.

Иванов М. А., Ермолаев О. П. Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и AsterGDEM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 98–109. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109

Измайлова А. В., Корнеев Н. Ю. Малые озера в пределах Ладожского бассейна // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцев. М.: РАН, 2021. С. 34–39.

Измайлова А. В., Науменко М. А. Общая характеристика водосбора // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцев. М.: РАН, 2021. С. 22–25.

Кондратьев С. А., Ульянова Т. Ю., Моисеенков А. И., Измайлова А. В., Шкробец А. Е. Информационное обеспечение работ по изучению водных ресурсов Ладожского озера и его бассейна // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 5. С. 538–542.

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

Кожкарев А. В. Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа // Вопросы географии. Сб. 140: Современная геоморфология / Отв. ред. В. М. Котляков, ред. В. В. Бронгулеев, А. Н. Маккавеев, Э. А. Лихачева. М.: Кодекс, 2015. С. 56–71.

Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.

Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / Ред. В. А. Румянцев, В. Г. Драбкова. СПб.: Наука, 2002. 326 с.

Литвиненко А. В. Комплексная характеристика водной сети Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 6–24. doi: 10.17076/lit1829

Лукашов А. Д. Геоморфологические особенности территории // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории Заонежского полуострова и Северного Приладожья / Под ред. А. Н. Громцева, В. И. Крутова. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. С. 198–208.

Мельник Г. Э., Стеблов Г. М., Галаганов О. Н., Крупеникова И. С., Мокрова А. Н., Розенберг Н. К., Передерин Ф. В., Передерин В. П. Исследование постледниковых движений Фенноскандии по

данным глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. 2022. № 2. С. 26–36. doi: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Молчанов И. В. Ладожское озеро. М.-Л.: Гидрометеиздат, 1945. 559 с.

Науменко М. А., Каретников С. Г. Ладожское озеро и его водосбор: цифровая модель и новые результаты // Труды XII съезда Русского географического общества (Кронштадт, 15–19 августа 2005 г.). Т. 6. Кронштадт: Изд-во СПбГУ, 2005. С. 82–86.

Науменко М. А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Известия РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 62–72. doi: 10.15356/0373-2444-2013-1-62-72

Науменко М. А., Каретников С. Г., Догановский А. М., Иванова Ю. А. Новое определение топографических характеристик водосбора Ладожского озера // Охрана и рациональное использование водных ресурсов Ладожского озера и других больших озер (Великий Новгород, 2–6 сентября 2002 г.). Великий Новгород: АССПИН, 2003. С. 412–415.

Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 484 с.

Опекунова М. Ю., Бардаш А. В. Морфометрический анализ рельефа бассейна реки Ии (Иркутская область) // География и природные ресурсы. 2022. № 1. С. 102–109. doi: 10.15372/GIPR20220111

Основные геоморфометрические параметры: теория // GIS-Lab. URL: <https://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html> (дата обращения: 06.02.2023).

Пузаченко Ю. Г., Онуфреня И. А., Алещенко Г. М. Анализ иерархической организации рельефа // Известия РАН. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.

Расулова А. М. Оценка динамики поверхностных водных объектов на водосборе Ладожского озера по данным Global Surface Water // Геодезия и картография. 2022. № 7. С. 39–48. doi: 10.22389/0016-7126-2022-985-7-39-48

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

Розенберг Н. К., Передерин Ф. В., Передерин В. П. Исследование постледниковых движений Фенноскандии по данным глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. 2022. № 2. С. 26–36. doi: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера европейской части России. СПб.: Лема, 2015. 392 с.

Симонов Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа. М.-Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 272 с.

Спирidonов А. И. Геоморфологическое картографирование. М.: Гос. изд-во геогр. литер., 1952. 185 с.

Шварев С. В., Голосов В. Н., Лебедева Е. В., Лихачева Э. А., Харченко С. В. Актуальная геоморфология: оценка природных рисков и системное природно-антропогенное взаимодействие // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92, № 6. С. 593–601. doi: 10.31857/S086958732206010X

Шелехова Т. С. Особенности четвертичных отложений и геоморфологии Зеленого пояса Фенноскандии // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 6. С. 17–23.

Fathom's Product Stack [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fathom.global/product/fabdem/> (дата обращения: 16.01.2023).

Florinsky I. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Academic Press, 2016. 506 p.

Håkanson L. The importance of lake morphometry and catchment characteristics in limnology – ranking based on statistical analyses // *Hydrobiologia*. 2005. Vol. 541. P. 117–137. doi: 10.1007/s10750-004-5032-7

Lehner B., Verdin K., Jarvis A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2008. Vol. 89(10). P. 93–94. doi: 10.1029/2008eo100001

Naumenko M. A. Lake Ladoga digital bathymetric models: development approaches and insight for limnological investigations // *Limnological Review*. 2020. Vol. 20(2). P. 65–80. doi: 10.2478/limre-2020-0008

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature*. 2016. No. 540(7633). P. 418–422. doi: 10.1038/nature20584

SAGA. System for Automated Geoscientific Analyses. URL: <http://saga-gis.org> (дата обращения: 21.01.2023).

Sánchez Schacht J. R., MacKeigan P. W., Taranu Z. E., Huot Ya., Gregory-Eaves. I. Agricultural land use and morphometry explain substantial variation in nutrient and ion concentrations in lakes across Canada // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2023. Vol. 80, no. 11. P. 1785–1797. doi: 10.1139/cjfas-2023-0109

References

Basic geomorphometric parameters: theory. *GIS-Lab*. (In Russ.). URL: <https://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html> (accessed: 06.02.2023).

Bronguleev V. V. Mathematical methods in geomorphology. Selected works. Moscow: Media-Press; 2018. 128 p. (In Russ.)

Drabkova V. G., Sorokin I. N. The lake and its catchment are a single natural system. Leningrad: Nauka; 1979. 196 p. (In Russ.)

Fathom's Product Stack. URL: <https://www.fathom.global/product/fabdem/> (accessed: 16.01.2023).

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia. A reference book. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 484 p. (In Russ.)

Florinsky I. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Academic Press; 2016. 506 p.

Galaganov O. N., Gorshkov V. L., Guseva T. V., Rozenberg N. K., Perederin V. P., Sherbakova N. V. Modern movements of the Ladoga-Onega crust according to satellite and ground-based measurements. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2011;8(2):130–136. (In Russ.)

Håkanson L. The importance of lake morphometry and catchment characteristics in limnology – ranking based

on statistical analyses. *Hydrobiologia = Hydrobiology*. 2005;541:117–137. doi: 10.1007/s10750-004-5032-7

Ivanov M. A., Ermolaev O. P. Geomorphometric analysis of river basins of the Volga Federal District using SRTM and Aster GDEM data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2017;14(2):98–109. (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109

Izmailova A. V., Korneenkova N. Yu. Small lakes within the Ladoga basin. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate*. Moscow; 2021. P. 34–39. (In Russ.)

Izmailova A. V., Naumenko M. A. General characteristics of the catchment. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate*. Moscow; 2021. P. 22–25. (In Russ.)

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

Kondrat'ev S. A., Ul'yanova T. Yu., Moiseenkov A. I., Izmailova A. V., Shkrebet A. E. Information support for studying water resources of Lake Ladoga and its basin. *Water Resources*. 2006;33(5):494–498. doi: 10.1134/S0097807806050034

Koshkarev A. V. Modern methods and technologies of digital elevation modeling. *Voprosy geografii. Sb. 140: Sovremennaya geomorfologiya = Issues of Geography. Iss. 140: Modern Geomorphology*. Moscow; 2015. P. 56–71. (In Russ.)

Lehner B., Verdin K., Jarvis A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2008;89(10):93–94. doi: 10.1029/2008eo100001

Litvinenko A. V. A comprehensive account of the Karelian water network. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2024;2:6–24. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1829

Lukashov A. D. Geomorphological features of the territory. *Inventarizatsiya i izuchenie biologicheskogo raznoobraziya na territorii Zaonezhskogo poluostrova i Severnogo Priladozh'ya = Inventory and study of biodiversity in the territory of the Zaonezhsky Peninsula and Northern Ladoga Region*. Petrozavodsk; 2000. P. 198–208. (In Russ.)

Mel'nik G. E., Steblov G. M., Galaganov O. N., Krupennikova I. S., Mokrova A. N., Rozenberg N. K., Perederin F. V., Perederin V. P. Study of the post-glacial movements of Fennoscandia according to global navigation satellite systems. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography*. 2022;2:26–36. (In Russ.). doi: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Molchanov I. V. Lake Ladoga. Moscow-Leningrad; 1945. 559 p. (In Russ.)

Naumenko M. A. Analysis of the morphometric characteristics of the underwater relief of Lake Ladoga based on a digital model. *Izvestiya RAN. Ser. Geogr. = Izvestia*

RAS. *Geographical Ser.* 2013;1:62–72. (In Russ.). doi: 10.15356/0373-2444-2013-1-62-72

Naumenko M. A., Karetnikov S. G. Lake Ladoga and its catchment: digital model and new results. *Trudy XII s"ezda Russkogo geograficheskogo obshchestva (Kronshtadt, 15–19 avgusta 2005 goda) = Proceedings of XII Congress of the Russian Geographical Society (Kronshtadt, August 15–19, 2005)*. Vol. 6. Kronshtadt: SPbGU; 2005. P. 82–86. (In Russ.)

Naumenko M. A., Karetnikov S. G., Doganovskii A. M., Ivanova Yu. A. A new definition of the topographic characteristics of the Lake Ladoga catchment. *Okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie vodnykh resursov Ladozhskogo ozera i drugikh bol'shikh ozer = Protection and rational use of water resources of Lake Ladoga and other large lakes*. Veliky Novgorod; 2003. P. 412–415. (In Russ.)

Naumenko M. A. Lake Ladoga digital bathymetric models: development approaches and insight for limnological investigations. *Limnological Review*. 2020;20(2):65–80. doi: 10.2478/limre-2020-0008

Opekunova M. Yu., Bardash A. V. Morphometric analysis of the relief of the Iya River basin (Irkutsk Region). *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2022;1:102–109. (In Russ.). doi: 10.15372/GIPR20220111

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016;540(7633):418–422. doi: 10.1038/nature20584

Puzachenko Yu. G., Onufrenya I. A., Aleshchenko G. M. Analysis of the hierarchical organization of relief. *Izvestiya RAN. Ser. Geogr. = Izvestia RAS. Geographical Ser.* 2002;4:29–38. (In Russ.)

Rasulova A. M. Assessment of surface water bodies dynamics in Lake Ladoga catchment area according to the project Global Surface Water. *Geodesy and Cartography*. 2022;7:39–48. (In Russ.). doi: 10.22389/0016-7126-2022-985-7-39-48

Rozenberg N. K., Perederin F. V., Perederin V. P. Study of the post-glacial movements of Fennoscandia

according to global navigation satellite systems. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography*. 2022;2:26–36. (In Russ.). doi: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Rumyantsev V. A. (ed.). Lake Ladoga and the sights of its shore. An atlas. St. Petersburg; 2015. 200 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G. (eds.). Lake Ladoga: past, present, future. St. Petersburg; 2022. 326 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. Lakes of the European part of Russia. St. Petersburg: Lema; 2015. 392 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A. (eds.). Ladoga. St. Petersburg; 2013. 468 p. (In Russ.)

SAGA. System for Automated Geoscientific Analyses. URL: <http://saga-gis.org> (accessed: 21.01.2023).

Sánchez Schacht J. R., MacKeigan P. W., Taranu Z. E., Huot Ya., Gregory-Eaves. I. Agricultural land use and morphometry explain substantial variation in nutrient and ion concentrations in lakes across Canada. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2023;80(11):1785–1797. doi: 10.1139/cjfas-2023-0109

Shelekhova T. S. Features of the Quaternary deposits and geomorphology of the Green Belt of Fennoscandia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2014;6: 17–23. (In Russ.)

Shvarev S. V., Golosov V. N., Lebedeva E. V., Likhacheva E. A., Kharchenko S. V. Current geomorphology: natural risk assessment and environmental and anthropogenic interaction. *Vestnik Rossiiskoi Akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2022;92(6):593–601. (In Russ.). doi: 10.31857/S086958732206010X

Simonov Yu. G. Morphometric analysis of relief. Moscow-Smolensk: Izd-vo SGU; 1998. 272 p. (In Russ.)

Spiridonov A. I. Geomorphological mapping. Moscow; 1952. 185 p. (In Russ.)

Surface water resources of the USSR. Karelia and the Northwest. Vol. 2, Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1972. 528 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 31.05.2024; принята к публикации / accepted: 13.09.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Корнеевкова Наталья Юрьевна

аспирант, младший научный сотрудник лаборатории географии и гидрологии

e-mail: ntkorn87@gmail.com

Науменко Михаил Арсеньевич

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

e-mail: m.a.naumenko@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Korneenkova, Natalya

Doctoral Student, Junior Researcher

Naumenko, Mikhail

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

УДК 551.312

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА, ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ЖЕЛЕЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КОНДОПОЖСКОЙ ГУБЫ (ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО)

Е. А. Вахрамеева*, Т. А. Жибарева

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н. П. Лаверова УрО РАН (пр. Никольский, 20, Архангельск,
Россия, 163020), *vakhr-elena@yandex.ru

Актуальность проводимых исследований обусловлена необходимостью изучения процессов перераспределения и трансформации органического вещества и распределения форм железа в толще донных осадков озер. Данные многолетнего мониторинга в Кондопожской губе позволяют выявить процессы, влияющие на формирование донных отложений. Результаты исследований подтвердили, что поступающее органическое вещество двойного происхождения – автохтонное при значительной продуктивности части залива и аллохтонное, гумусовой природы терригенного происхождения, попадая в залив, осаждается на дно. Содержание органического вещества в донных отложениях связано с их гранулометрическим составом и содержанием железа. Выявлена корреляционная связь между этими показателями.

Ключевые слова: гранулометрический состав; донные отложения; автохтонное и аллохтонное органическое вещество; органический углерод; железо

Для цитирования: Вахрамеева Е. А., Жибарева Т. А. Распределение гранулометрического состава, органического вещества и железа донных отложений Кондопожской губы (Онежское озеро) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 18–27. doi: 10.17076/lim1902

Е. А. Vakhrameeva*, Т. А. Zhibareva. DISTRIBUTION OF THE PARTICLE-SIZE COMPOSITION, ORGANIC MATTER AND IRON IN BOTTOM SEDIMENTS OF KONDOPOGA BAY (LAKE ONEGO)

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

Research into the processes of organic matter redistribution and transformation and the distribution of iron forms in the lake sediment column are of high relevance. Data from long-term monitoring in Kondopoga Bay provide insights into the processes that influence the formation of bottom sediments. The research results confirm that the incoming organic matter is of dual origin – autochthonous, due to significantly high productivity in part of the bay, and allochthonous, terrigenous matter of humic nature. Entering the bay, it settles

to the bottom. The organic matter content of the sediments is related to their particle size distribution and iron content. A correlation between these indicators was revealed.

Keywords: particle-size composition; lake sediments; autochthonous and allochthonous organic matter; organic carbon; iron

For citation: Vakhrameeva E. A., Zhibareva T. A. Distribution of the particle-size composition, organic matter and iron in bottom sediments of Kondopoga Bay (Lake Onego). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 18–27. doi: 10.17076/lim1902

Введение

Кондопожская губа – один из крупнейших и глубоководных районов Онежского озера, с грядой из более 20 островов, характеризующийся сильной расчлененностью береговой линии и сложным рельефом дна. Исследуемый водоем в северной части принимает воды р. Суны, впадающей около г. Кондопоги и несущей с водосбора воду, обогащенную гуминовыми веществами, и стоки крупнейшего Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК). Длина залива – 33 км, максимальная ширина – 9,5 км, объем водных масс – 4,3 км³, наибольшая глубина – 82 м, средняя – 21 м, площадь водного зеркала – 223 км² [Тимакова и др., 2014]. Этот район Онежского озера относится к наиболее обследованному, хорошо изученному [Васильева, 1990; Белкина, 2011; Тимакова, 2014; Калинин, Белкина, 2018]. Комплексные наблюдения за экологическим состоянием и качеством вод губы были начаты в 1960-е годы и проводились после важнейших изменений экологической ситуации в водоеме. Как показано в работе [Тимакова и др., 2014], в 1980-х годах были предприняты меры по нейтрализации кислых стоков, введены в эксплуатацию глубинный рассеивающий выпуск производственных вод и станция биологической очистки.

Наиболее подробная характеристика донных отложений (ДО), их гранулометрический и физико-химический состав приведены в работах [Семенович, 1973; Васильева, 1990]. Согласно Д. А. Субетто с соавт. [2022], озерные отложения котловины Онежского озера представлены ледниково-озерными и озерными отложениями – текуче-глинистыми алевритами и алевропелитами серого и зеленовато-серого (нижняя часть) цвета, которые вверх по разрезу переходят в текуче-органогенные и минерально-органогенные илы.

Донные отложения являются индикатором различных природных и антропогенных процессов, происходивших за весь период существования водоема. Гранулометрический состав ДО озерных экосистем является одним

из основных параметров, характеризующих типы осадков, а также дающих возможность судить о механизме процесса седиментации и динамике водной среды. Донные отложения аккумулируют органические (ОВ) и минеральные вещества, обуславливая этим нарушение геохимических циклов биогенных элементов. В толще ДО Кондопожской губы накоплена огромная информация об антропогенном влиянии сточных вод Кондопожского ЦБК и хозяйственно-бытовых стоков города Кондопоги [Васильева, 1990; Белкина, 2011; Тимакова и др., 2014; Калинин, Белкина, 2018].

Основными компонентами водоема, способного самостоятельно создавать (производить) ОВ, являются автотрофные организмы (водоросли, высшая водная растительность) и бактерии. Однако именно ОВ растительного происхождения является энергетической основой для продуцирования. Процессы образования ОВ и их распада называют процессами «продукции» (создание, производство) и «деструкции» (разрушение). Не весь органический материал разрушается с одинаковой скоростью. Жиры, сахара и белки разлагаются быстро, а древесина (клетчатка, лигнин) – очень медленно. Наиболее устойчивым промежуточным продуктом разложения органических веществ является гумус (перегной), дальнейшая минерализация которого происходит медленно. Гумусовые вещества представляют собой продукты конденсации ароматических соединений (фенолов, бензолов и др.) с продуктами распада белков и полисахаров; для их расщепления, видимо, требуются специальные ферменты, которые часто отсутствуют у почвенных и водных гетеротрофных организмов [Шилов, 2011].

Целью данного исследования является изучение гранулометрического состава и распределения органических веществ по содержанию потерь при прокаливании (ППП), общего ($C_{\text{общ}}$) и органического ($C_{\text{орг}}$) углерода, общего ($N_{\text{общ}}$) и органического ($N_{\text{орг}}$) азота, а также железа в донных отложениях кернов Кондопожской губы по мере удаления от источника антропогенного загрязнения.

Объекты и методы исследования

Отбор проб ДО в Кондопожской губе проводили в августе 2015 г. совместно с сотрудниками КарНЦ РАН. Пробы поверхностного слоя (0–5 см) отбирали дночерпателем Экмана-Берджа, кернов – поршневой трубкой длиной 50 см (модифицированный вариант стратометра Алексона) [Белкина, 2011]. Дискретность отбора проб 5 см.

Разрез К3–К7 [Сярки, Фомина, 2019], состоящий из пяти станций, представлен на рис. 1. Характеристика станций отбора показана в табл. 1. Следует выделить ст. К7 на выходе из губы, где отбирался поверхностный слой глубиной 5 см. Исследования, проводимые с 1990-х годов на этих станциях, получили мониторинговый характер.

Намеченные станции отличаются по морфологическим и гидрологическим характеристикам (табл. 1).

Непосредственно после отбора в судовой лаборатории в ДО определялся pH. Исследование гранулометрического состава, распре-

деления органического вещества и железа в донных осадках проводили в лаборатории эко-аналитических исследований в г. Архангельске.

Во влажных образцах определяли естественную влажность при температуре 105 ± 2 °С, гранулометрический состав и железо Fe(II) и Fe(III). В воздушно-сухих образцах – органическое вещество по содержанию ППП при 550 °С [Heiri et al., 2001]. Расчет ППП проводили на абсолютно сухую навеску. Определение общего органического углерода и органического азота выполняли методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на C,H,N-анализаторе фирмы «Hewlett-Packard».

Гранулометрический состав ДО озер определяли в соответствии с методикой [МИ № 88-16365-010-2017]. Расчет содержания фракций проводили на абсолютно сухую навеску образца. Относительная погрешность измерения для всех гранулометрических фракций составляет от 19 до 29 %. Гранулометрические фракции представлены в классификации Н. А. Качинского [Логвиненко, Сергеева, 1986].

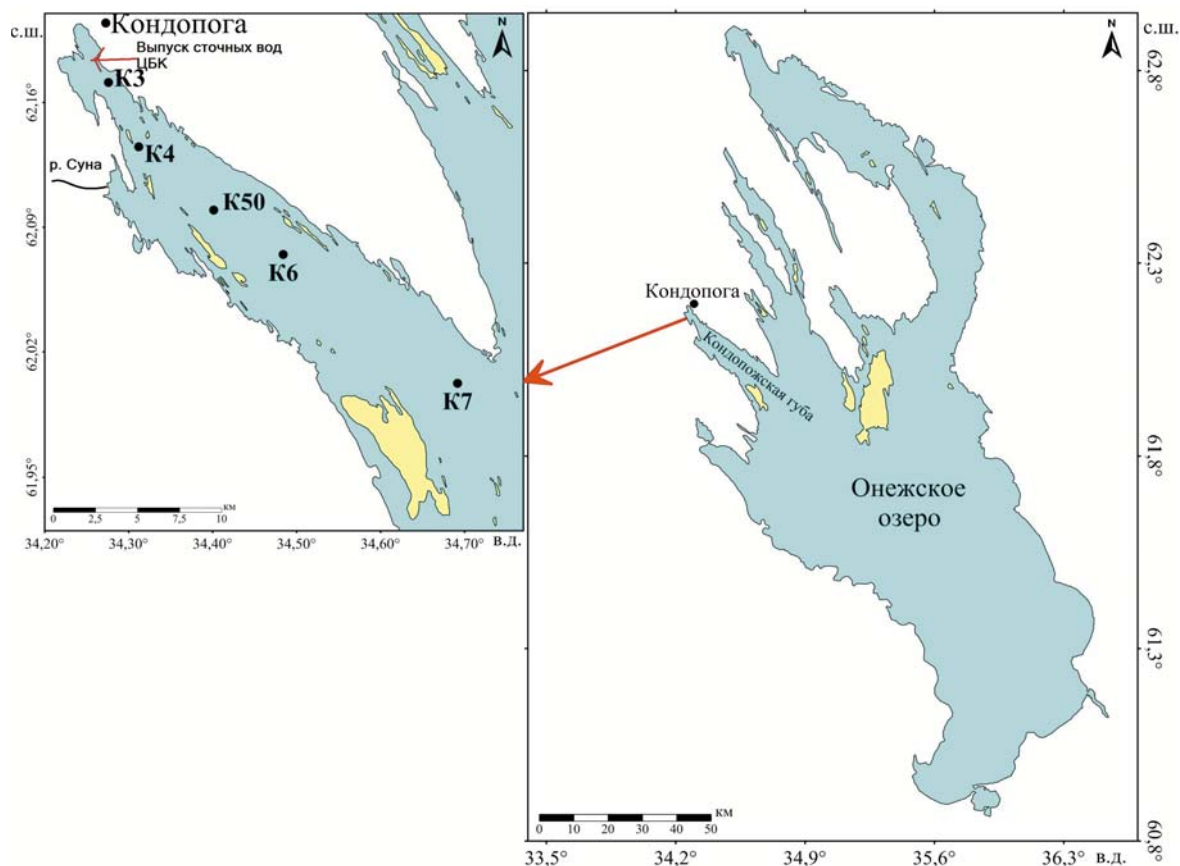


Рис. 1. Карта-схема отбора кернов донных отложений в Кондопожской губе Онежского озера

Fig. 1. Schematic map of sediment core sampling in Kondopoga Bay of Lake Onego

Таблица 1. Морфометрические характеристики Кондопожской губы и место отбора кернов донных отложений
Table 1. Morphometric characteristics of Kondopoga Bay and the location of sediment core sampling

Станция Station	Координаты точки отбора Coordinates of the sampling point	Расстояние от выпуска ЦБК, км Distance from the PPM outlet, km	Глубина отбора, м Sampling- depth, m	Мощность керна, см Core thickness, cm	Первичная характеристика осадка Primary characteristics of sediment
K3	62° 10.283'N 34° 16.553'E	0,2	12	0–50	Коричневый жидкий ил с песком, волокном, переходящий в пластичный серый и глину Brown liquid silt with sand, fiber, turning into soft gray and clay
K4	62° 08.102'N 34° 18.715'E	4,0	27	0–25	Коричневый жидкий ил, переходящий в плотный серый с растительностью Brown liquid silt turning into dense gray with vegetation
K50	62° 05.976'N 34° 24.078'E	10,0	39	0–35	Ил коричневый Brown silt
K6	62° 04.482'N 34° 29.052'E	15,0	78	0–45	Коричневый жидкий ил, переходящий в плотный серый с черными слоями Brown liquid silt turning into dense gray with black layers
K7	62° 00.150'N 34° 41.511'E	28,0	30	0–5	Светло-коричневый наиллок, переходящий в серо-коричневую глину Light brown silt deposit turning into gray-brown clay

Определение реакционноспособных форм железа осуществляли после извлечения их из осадка 3,5 N серной кислотой [Соколов, 1980]. Fe(II) определяли в аликвоте раствора титрованием $K_2Cr_2O_7$, Fe(III) – из другой аликвоты, титрованием $Na_2S_2O_3$ выделившегося I_2 после обработки KI.

Микрофотографии ДО сделаны на микроскопе AltamiBio2 с увеличением в 100 раз.

Результаты и обсуждение

По данным гранулометрического анализа (табл. 2), керны ДО, отобранные на ст. K3 и K4, представлены алевропелитовыми илами с варьированием алеврита от 18,18 до 55,94 %. Верхние слои керна K3 содержат жидкий серый ил с включением древесных волокон, поступающих со сточными водами ЦБК [Белкина, 2011; Калинкина, Белкина, 2018]. Нижележащие слои кернов с этих станций содержат до 78,0 % пелита. На ст. K7 на выходе из залива первые 2 см определились как алевритовый песок, а последующие 3 см – алеврит с вариацией влажности от 29,5 % среднего слоя до 59,3 % в поверхностном слое (рис. 2). Все остальные пробы были сильно обводнены, влажность осадков варьирует от 73,6 до 94,5 %.

Анализ гранулометрического состава также показал, что ДО кернов состоят из чередующихся слоев серого и коричневого пелитового и алевропелитового ила. Так, в ДО ст. K50 и K6 по всей глубине кернов с увеличением глубины залива и удалением от выпуска сточных вод

Кондопожского ЦБК возрастает содержание пелитовой фракции (до 98,02 %), т. е. осадок становится более отсортированным и мелкодисперсным (табл. 2; рис. 3, а).

Общее содержание органического вещества по параметру ППП составляет в ДО по всем кернам от 2,41 до 45,72 % (табл. 3). Наибольшие значения ППП наблюдаются в слоях глубиной до 35 см в керне ст. K3, расположенной в районе сброса сточных вод Кондопожского ЦБК. Содержание ППП по разрезу K4–K6 также повышенное, но постоянное по всей длине кернов – от 12,27 до 28,22 %. Низкое содержание ППП в слоях 2–5 см на станции K7 в среднем 3,13 %, что подтверждает глинистый тип осадка (84,34 % алевритов).

Донные отложения алевропелитового и пелитового состава содержат повышенные концентрации $C_{орг}$ – от 1,21 % в нижних слоях керна до 11,18 % в поверхностном слое на ст. K3, что предполагает значительный разброс ОВ при практически одинаковом гранулометрическом составе ДО (табл. 2, 3; рис. 4). Полученные концентрации $N_{общ}$ и $N_{орг}$ практически равны и варьируют от 1,93 % в поверхностном слое до их исчезновения в нижней части керна.

Изменение концентраций ОВ зависит от особенностей продукционных процессов в озере. Изменчивость содержания всех форм азота в ДО связана с поступлением ОВ природного и антропогенного происхождения со взвешенными веществами и физико-химическими и биологическими превращениями в процессе оседания их в водной толще.

Таблица 2. Анализ типа донных отложений по содержанию гранулометрических фракций в ядрах Кондопожской губы (средние значения*)

Table 2. Analysis of the bottom sediments type by the content of granulometric fractions in cores of Kondopoga Bay (average values*)

Станция Station	Горизонт слоя, см Layer horizon, cm	Фракционный состав, % Fractional composition, %			Влажность, % Wetness, %	pH	Тип осадка Sediment type
		Песок Sand	Алевриты Silts	Пелит Pelites			
K3	0–10	1,78	53,97	44,26	95,3	6,27	Пелитоалеврит Pelite-silt
	10–15	11,94	36,00	52,06	93,3	6,19	Алевропелит с включением древесных остатков Silt-pelite with wood residues
	20–50	1,91	28,22	69,88	82,7	6,48	Алевропелит Silt-pelite
K4	0–15	1,13	37,24	61,33	89,3	6,63	Алевропелит Silt-pelite
	20–25	1,05	27,83	68,13	82,9	6,43	Алевропелит Silt-pelite
K50	0–35	1,64	10,11	88,21	84,6	6,95	Пелиты Pelites
K6	0–45	0,85	17,93	81,21	85,5	6,94	Пелиты Pelites
K7	0–2	45,64	42,68	11,68	44,4	6,61	Алевритовый песок Silt-sand
	2–5	9,01	84,34	6,65	43,7	6,53	Алеврит Silt

Примечание. *Представлены средние значения определяемых показателей в однотипных слоях осадков, глубина слоев суммируется.

Note. *The average values of the determined indicators of the sediment layers of the same type are given, the depth of the layers is summed up.

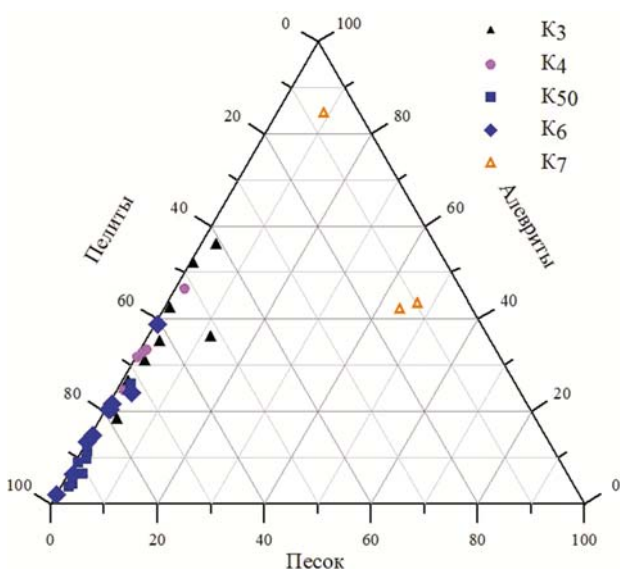


Рис. 2. Трехкомпонентная диаграмма гранулометрического состава ядер донных отложений Кондопожской губы

Fig. 2. Three-component diagram of the granulometric composition of sediments cores in Kondopoga Bay

Процесс накопления органического вещества в ДО отчетливо прослеживается на ст. К3 и К4 в северной части Кондопожской губы, принимающей сточные воды ЦБК. Ядра, отобранные в данной части залива (табл. 1), насыщены труднорастворимым органическим веществом (целлюлоза, остатки древесины, лигносульфоновые кислоты и др.), с запахом, грязно-серого и черного цвета в отличие от светлых оттенков коричневых и серых илов из глубоководной части губы [Белкина, 2011; Калинин, Белкина, 2018].

Полученные данные по содержанию в поверхностном слое ППП, $C_{орг}$ и $N_{орг}$ в Кондопожской губе указывают на наличие убывающего градиента распределения органических веществ от ЦБК в сторону открытого озера (рис. 3, б, 4; табл. 3). Общей закономерностью для всех исследованных ДО, как и по данным Н. И. Семеновича [1973], является наличие обратной взаимосвязи между $C_{орг}$ и содержанием пелитовой фракции с коэффициентом корреляции $r_{0,95} = -0,35$ ($n = 31$), что отражает

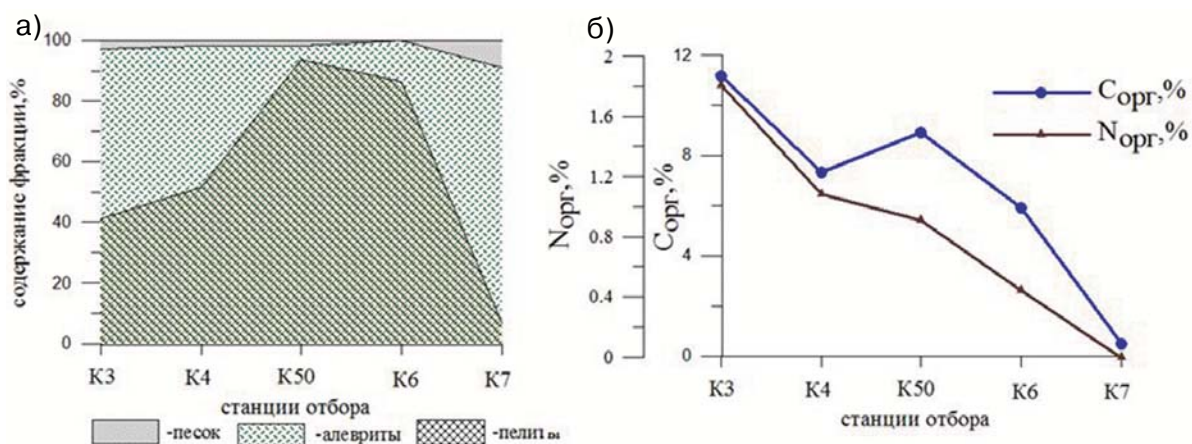


Рис. 3. Распределение гранулометрического состава (а) и $C_{орг}$, $N_{орг}$ (б) в поверхностном слое донных отложений по разрезу К3–К7 в Кондопожской губе

Fig. 3. Distribution of granulometric fractions (a) and C_{org} , N_{org} (б) in the surface layer of bottom sediments along the K3–K7 section in Kondopoga Bay

Таблица 3. Распределение органического вещества и железа в кернах донных отложений Кондопожской губы (средние значения)

Table 3. Distribution of organic matter and iron in cores of bottom sediments in Kondopoga Bay (average values)

Станция Station	Горизонт слоя, см Layer horizon, cm	ППП, % Loss on ignition, %	$C_{общ}, %$ $C_{tot}, %$	$C_{орг}, %$ $C_{org}, %$	$N_{орг}, %$ $N_{org}, %$	$C_{орг}/N_{орг}$ C_{org}/N_{org}	Fe(II), %	Fe(III), %
К3	0–10	45,34	12,73	10,93	1,77	6,2	1,02	2,87
	10–15	39,84	9,16	8,82	0,73	12,1	0,78	1,16
	15–35	38,13	10,50	8,41	0,37	23,2	0,64	0,71
	40–50	10,34	1,86	1,70	0,06	34,6	1,04	1,06
К4	0–15	28,22	7,31	7,01	0,90	7,9	0,72	2,30
	20–25	25,84	5,81	3,63	0,29	15,6	0,68	1,60
К50	0–10	18,57	8,96	7,49	0,79	9,4	0,97	3,34
	15–35	12,02	4,18	3,75	0,39	10,1	1,29	2,61
К6	0–25	16,27	5,70	4,80	0,27	18,9	1,18	4,02
	30–45	15,67	3,24	2,56	0,08	41,5	0,60	3,18
К7	0–2	3,82	0,53	0,29	н.о.	-	0,15	0,96
	2–5	3,13	0,08	н.о.	н.о.	-	0,08	0,47

Примечание. н.о. – не обнаружено; «-» – расчет невозможен из-за отсутствия азота.

Note. н.о. – not found; «-» – calculation is not possible due to the lack of nitrogen.

высокое содержание мелких минеральных частиц глины (рис. 5, а). На рис. 5 (б) видна тесная взаимосвязь ОВ с органическим углеродом и азотом, указывающая на единый источник поступления их в ДО.

Соотношение $C_{орг}/N_{орг}$ в ДО отобранных кернов, отражающее удельный вес органического вещества аллохтонного и автохтонного происхождения, варьирует в широком диапазоне от 6 до 81 (рис. 4, в). Органическое вещество является автохтонным, если соотношение $C_{орг}/N_{орг}$ близко к 12. Если $C_{орг}/N_{орг}$ более 12, ОВ представляет собой смесь веществ автохтонного и аллохтонного типа. Среднее значение $C_{орг}/N_{орг}$ в

кернах на ст. К50 равно 9,8 – соответственно, автохтонное органическое вещество ДО, продуцируемое водной растительностью, образуется на этой глубоководной станции [Хатчинсон, 1969; Белкина, 2011], а на остальных станциях присутствует поступление органического материала со стоками ЦБК и глинистого и карбонатного материала с водосборной площади залива. Среди почв водосборного бассейна наиболее распространены подзолы иллювиально-железистого и иллювиально-гумусово-железистого типа, что способствует поступлению железа в озеро, образуя комплексы с гумусовыми кислотами, растворимыми в воде [Субетто и др., 2022].

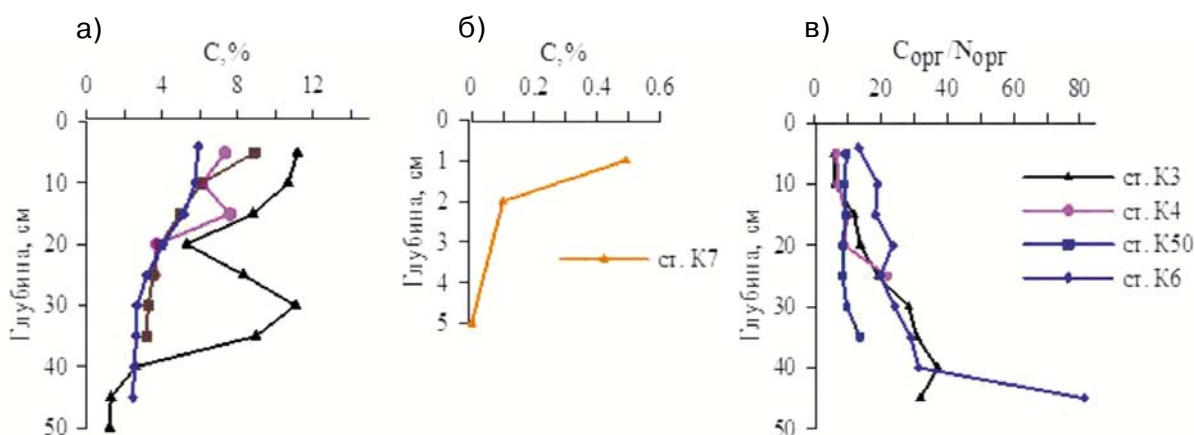


Рис. 4. Распределение $C_{\text{орг}}$ (а, б) и величины $C_{\text{орг}}/N_{\text{орг}}$ (в) в кернах донных отложений
 Fig. 4. Distribution of $C_{\text{орг}}$ (а, б) and $C_{\text{орг}}/N_{\text{орг}}$ (в) values in sediments cores

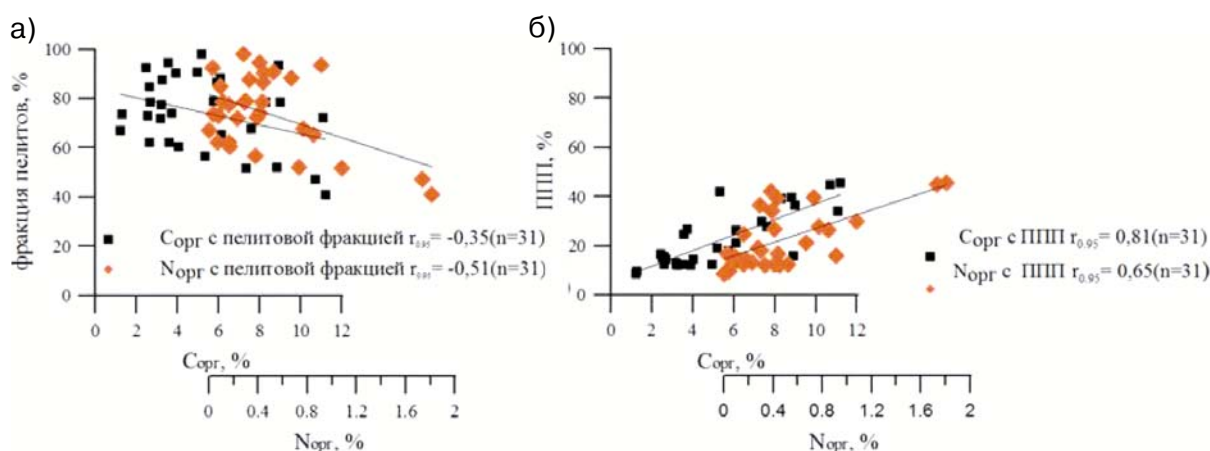


Рис. 5. Взаимосвязь пелитовой фракции и ППП (б) с $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{орг}}$
 Fig. 5. Relationship between pelitic fraction (а) and loss on ignition (б) with $C_{\text{орг}}$ and $N_{\text{орг}}$

На всех станциях количество Fe(II) распределяется по всей глубине колонок неравномерно – от 0,08 % на ст. К7 до 1,95 % на ст. К50 в середине керна. А с трехвалентным железом наблюдается совсем иная картина. Высокие концентрации Fe(III) отмечаются на разрезе К3–К6 в поверхностном слое 0–5 см – 4,32 и 7,22 % соответственно. Также выделяются две ст. К50 и К6 с повышенным содержанием Fe(III) по всему керну (табл. 3). Подобные средние значения Fe(II) в донных отложениях наблюдали с 2014 по 2016 гг. в озере Нижнее в Архангельской области – 1,15 % и Fe(III) – 2,15 % [Титова и др., 2019]. Концентрации железа в исследуемых кернах ДО практически не отличаются от значений валового железа в ДО Кондопожской губы, полученных ранее [Калинкина, Белкина, 2018].

Осадки ст. К7 отличаются от ДО поверхностного слоя на ст. К3–К6 по содержанию железа (табл. 3; рис. 6).

На рис. 7 представлены фото для сравнения содержания железа в слое 0–5 см на станции К6 (7,22 %) и в слое 0–2 см на ст. К7 (0,96 %).

Содержание Fe(III) составляет 7,22 % в поверхностном слое ДО и постепенно снижается к низу керна до 2,46 % на ст. К6, а на ст. К7 наблюдаем обратную картину – содержание железа минимальное и варьирует от 1,32 % на поверхности до 0,47 % на глубине 5 см.

Наличие взаимосвязи органического углерода с содержанием железа в донных осадках керна на глубоководной станции К6 представлено на рис. 8.

Можно предположить, что железо поступает в Кондопожскую губу с водами р. Суны как во взвешенной форме, так и в растворенной в виде комплексных соединений трехвалентного железа с гумусовыми веществами, а далее осаждается на дно.

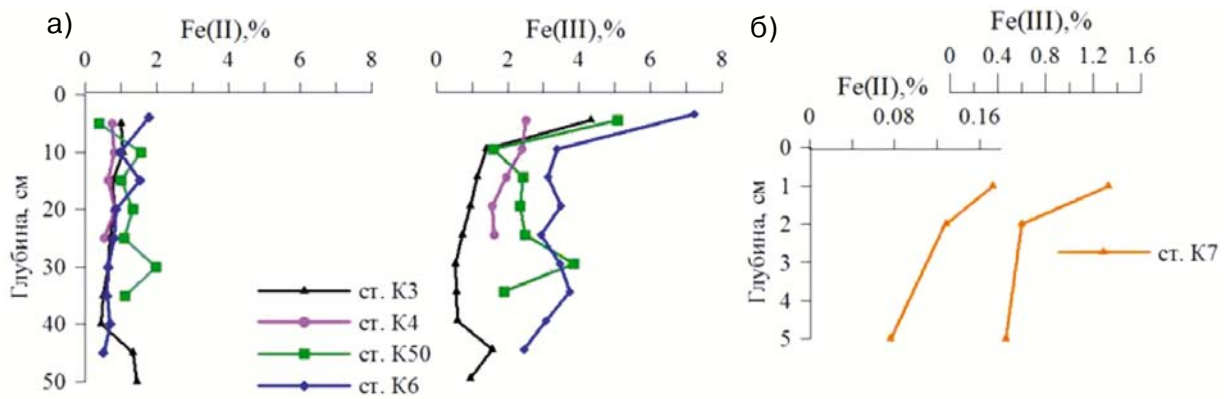


Рис. 6. Вертикальное распределение Fe(II) и Fe(III) на ст. К3–К6 (а) и на ст. К7 (б) в ядрах донных отложений озера

Fig. 6. Vertical distribution of Fe(II) and Fe(III) at st. K3–K6 (a) and at st. K7 (б) in cores of the lake sediments

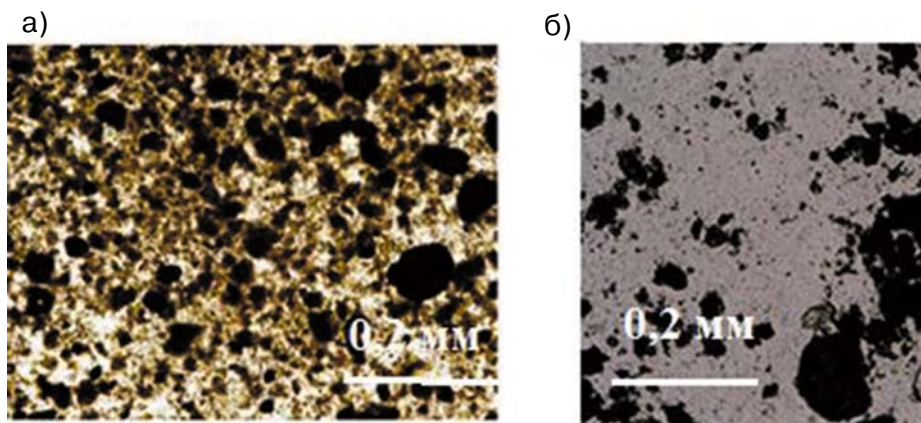


Рис. 7. Микрофотографии ДО на ст. К6 (а) и К7 (б)

Fig. 7. Microphotographs of the sediments at st. K6 (a) and K7 (б)

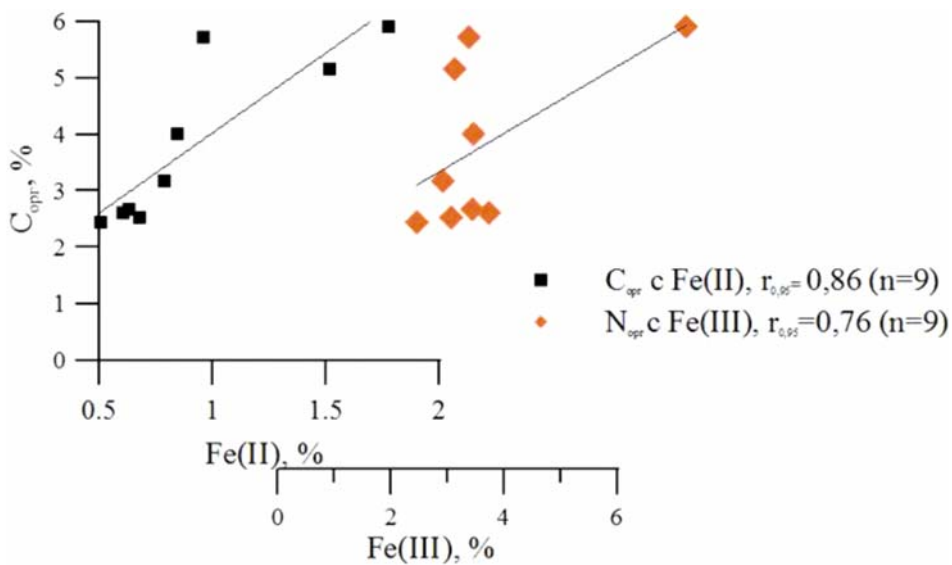


Рис. 8. Взаимосвязь органического углерода с Fe(II) и Fe(III) в ядре донных отложений ст. К6

Fig. 8. Relationship of organic carbon with Fe(II) and Fe(III) in the core of bottom sediments at st. K6

Заключение

Проведение многолетнего мониторинга в Кондопожской губе позволяет выявить процессы, влияющие на формирование состава донных отложений. Различия в процессах осадконакопления в вершинной части губы и на выходе определяются неравномерным распределением речного стока и антропогенной нагрузки. Значительный разброс концентраций ОВ при практически одинаковом составе ДО обуславливается различной седиментационной нагрузкой взвешенного вещества. В ходе проведенных исследований поверхностного слоя донных осадков распределение ППП, $C_{орг}$, $N_{орг}$ в Кондопожской губе свидетельствует о наличии убывающего градиента от ЦБК в сторону открытой части озера.

В заливе с высокой антропогенной нагрузкой в ДО превалирует аллохтонное органическое вещество над автохтонным. Установлено, что только на ст. К50 автохтонное органическое вещество ДО образуется в самом заливе.

Содержание органического вещества в донных отложениях связано с их гранулометрическим составом и содержанием железа. Выявлена корреляционная связь между этими показателями.

Литература

Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 35–41.

Васильева Е. П. Донные отложения. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Ред. З. С. Кауфмана. Л.: Наука, 1990. С. 147–175.

Калинкина Н. М., Белкина Н. А. Динамика состояния бентосных сообществ и химического состава донных отложений Онежского озера в условиях действия антропогенных и природных факторов // Принципы экологии. 2018. № 2. С. 56–74.

Логвиненко Н. В., Сергеева Э. И. Методы определения осадочных пород. Л.: Недра, 1986. 240 с.

МИ № 88-16365-010-2017 «Донные отложения водоемов. Определение гранулометрического состава ситовым и пипеточным методами». Введена 26.12.2017. Архангельск, 2017. 12 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука, 1973. 102 с.

Соколов В. С. Химический анализ морских осадков / Ред. В. С. Соколов. М.: Химия, 1980. С. 28–42.

Субетто Д. А., Белкина Н. А., Страховенко В. Д., Рыбалко А. Е., Зобков М. Б., Потахин М. С., Кулик Н. В., Ефременко Н. А., Лаврова Н. Б., Рязанцев П. А., Тарасов А. Ю., Филимонова Л. В., Шелехова Т. С., Шварев С. В., Алешин М. И., Беляев П. Ю., Бородулина Г. С., Здорвеннова Г. Э., Здорвеннов Р. Э.,

Ибрагимова А. Г., Карпечко Ю. В., Корост С. Р., Корост Д. В., Кузнецов В. Ю., Кухарев В. И., Левицев М. А., Малов В. И., Никонов А. А., Овдина Е. А., Орлов А. В., Рябинкин А. В., Слабунов А. И., Токарев М. Ю., Фролова Л. А., Гатальская Е. В., Кравченко И. Ю., Ханг Т. Палеолимнология Онежского озера; от приледникового озера к современным условиям / Ред. Д. А. Субетто. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 331 с.

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Современное состояние зоопланктона Кондопожского залива Онежского озера // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 3. С. 33–40. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_3_33

Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 74–82. doi: 10.7868/S032105961401012X

Титова К. В., Кокрятская Н. М., Вахрамеева Е. А. Мониторинговые исследования донных отложений антропогенно нагруженного озера Нижнее (Архангельская область) // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Мат-лы II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань, 2019. С. 189–194.

Шилов И. А. Экология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2011. 512 с.

Хатчинсон Д. Лимнология. Географические, физические и химические характеристики озер. М.: Прогресс, 1969. 591 с.

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // J. of Paleolimnol. 2001. Vol. 25. P. 101–110. doi: 10.1023/A:1008119611481

References

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

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. of Paleolimnol.* 2001. Vol. 25. P. 101–110. doi: 10.1023/A:1008119611481

Hutchinson G. Limnology: Geographical, physical and chemical characteristics of lakes. Moscow: Progress; 1969. 591 p. (In Russ.)

Kalinkina N. M., Belkina N. A. Dynamics of benthic communities state and the sediment chemical composition in Lake Onega under the influence of anthropogenic and natural factors. *Printsipy ekologii = Principles of the Ecology*. 2018;2:56–74. (In Russ.)

Logvinenko N. V., Sergeeva E. I. Methods for determining sedimentary rocks. Leningrad: Nedra; 1986. 240 p. (In Russ.)

MI No. 88-16365-010-2017. Bottom sediments of water bodies. Determination of granulometric com-

position by sieve and pipetting methods. Accepted 26.12.2017. Arkhangel'sk; 2017. 12 p. (In Russ.)

Shilov I. A. Ecology: a university textbook. Moscow: Yurait; 2011. 512 p. (In Russ.)

Semenovich N. I. Bottom sediments of Lake Onega. Leningrad: Nauka; 1973. 102 p. (In Russ.)

Sokolov V. S. Chemical analysis of marine sediments. Moscow: Khimiya; 1980. P. 28–42. (In Russ.)

Subetto D. A., Belkina N. A., Strakhovenko V. D., Rybalko A. E., Zobkov M. B., Potakhin M. S., Kulik N. V., Efremenko N. A., Lavrova N. B., Ryazantsev P. A., Tarasov A. Yu., Filimonova L. V., Shelekhova T. S., Shvarev S. V., Aleshin M. I., Belyaev P. Yu., Borodulina G. S., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Ibragimova A. G., Karpechko Yu. V., Korost S. R., Korost D. V., Kuznetsov V. Yu., Kukharev V. I., Levichev M. A., Malov V. I., Nikonov A. A., Ovdina E. A., Orlov A. V., Ryabinkin A. V., Slabunov A. I., Tokarev M. Yu., Frolova L. A., Gatal'skaya E. V., Kravchenko I. Yu., Khang T. Palaeolimnology of Lake Onega: from a glacial lake to modern conditions. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2022. 331 p. (In Russ.)

Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. Current state of zooplankton in Kondopoga Bay of Lake Onego. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya = Aquatic Bioresources & Environment*. 2019;2(3):33–40. (In Russ.). doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_3_33

Timakova T. M., Kulikova T. P., Litvinova I. A., Polyakova T. N., Syarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. Changes in biocenoses of Kondopoga Bay, Lake Onego, under the effect of effluents from a pulp and paper mill. *Water Resources*. 2014;41(1):78–86. doi: 10.1134/S0097807814010126

Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Vakhrameeva E. A. Monitoring studies of bottom sediments of the anthropogenically loaded Lake Nizhneye (Arkhangel'sk Region). *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mat-ly II Mezhdunar. konf. (Kazan', 19–24 maya 2019 g.) = Lakes of Eurasia: Problems and ways to solve them. Proceed. II Int. conf. (Kazan, May 19–24, 2019)*. Kazan'; 2019. P. 189–194. (In Russ.)

Vasil'eva E. P. Bottom sediments. Ecosystem of Lake Onega and trends in its change. Leningrad: Nauka; 1990. P. 147–175. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 24.04.2024; принята к публикации / accepted: 30.08.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Вахрамеева Елена Анатольевна

научный сотрудник

e-mail: vakhr-elena@yandex.ru

Жибарева Татьяна Александровна

младший научный сотрудник

e-mail: ostrivok.vj_nt@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Vakhrameeva, Elena

Researcher

Zhibareva, Tatyana

Junior Researcher

УДК 550.47

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОЕМОВ НА ТЕРРИТОРИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «КЕНОЗЕРСКИЙ»

К. В. Титова*, **Н. М. Кокрятская**

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

Исследованы донные отложения озер Масельгское, Пижихерье (бассейн Балтийского моря) и Лекшмозеро (бассейн Белого моря), отобранные в марте 2022 года. Результаты определения содержания железа в донных отложениях, полученные методами титриметрии и масс-спектрометрии, показали значительные количества этого элемента в осадках исследованных озер Масельгское и Пижихерье, которые обусловлены поступлением из почв водосбора, болот и внутриводоемными процессами. Высокие концентрации растворенного железа в водной толще оз. Масельгское также связаны с анаэробными процессами его восстановления в донных отложениях. Это подтверждается снижением концентраций реакционноспособного железа в поверхностных слоях осадков по сравнению с нижележащими, что отличает данный водоем от двух других исследованных озер. В осадках оз. Масельгское активнее, чем в отложениях других озер, протекал процесс сульфатредукции, что нашло отражение в содержании и распределении форм серы и железа. Данный факт обусловлен постепенной сменой мезотрофного статуса оз. Масельгское на эвтрофный, связанной с накоплением биогенных компонентов. Отложения озер Масельгское и Пижихерье содержали большее количество органического вещества и соединений серы по сравнению с оз. Лекшмозеро. Концентрации неорганических соединений углерода в осадках исследованных озер достигали нескольких процентов от сухого вещества отложений, что обусловлено преобладанием на водосборе балтийских озер известняков и мергелей, а в районе Лекшмозера – карбонатной морены. Вещественный (гранулометрический) состав донных отложений в оз. Масельгское связан как с изменением условий осадконакопления, так и с процессами эрозии озовой гряды – Беломоро-Балтийского водораздела.

Ключевые слова: Архангельская область; национальный парк «Кенозерский»; пресноводные озера; донные отложения; соединения серы и железа

Для цитирования: Титова К. В., Кокрятская Н. М. Биогеохимические процессы в донных отложениях водоемов на территории национального парка «Кенозерский» // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 28–44. doi: 10.17076/lim1917

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦКИА УрО РАН.

K. V. Titova*, N. M. Kokryatskaya. BIOGEOCHEMICAL PROCESSES IN SEDIMENTS OF LAKES IN THE KENOZERSKY NATIONAL PARK

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

We studied the sediments of lakes Maselgskoye, Pezhikherye (Baltic Sea basin) and Lyokshmozero (White Sea basin) sampled in March 2022. Measurements of iron content in bottom sediments by titrimetry and mass spectrometry revealed significant amounts of this element in the sediments of lakes Maselgskoe and Pezhikherye, which are due to leaching from soils of the catchment area, mires and intra-reservoir processes. The high concentrations of iron dissolved in the water column of Lake Maselgskoe are also associated with the processes of its anaerobic reduction in bottom sediments. This is confirmed by a decrease in the concentrations of reactive iron in the surface layers of sediments compared to the underlying layers, which distinguishes this reservoir from the other two lakes studied. The process of sulfate reduction in sediments of Lake Maselgskoe was more active than in sediments of the other two lakes, which was reflected in the content and distribution of various forms of sulfur and iron. This fact is associated with an ongoing gradual change of Lake Maselgskoe nutrient status from mesotrophic to eutrophic as a result of nutrient accumulation. Sediments of lakes Maselgskoye and Pezhikherye contained a larger amount of organic matter and sulfur compounds compared to Lake Lyokshmozero. The concentrations of inorganic carbon compounds in sediments of the studied lakes were up to several percent of the sediment dry matter, which is due to the predominance of limestones and marls in the catchment area of the Baltic lakes, and carbonaceous till in the Lyokshmozero area. The composition (particle-size distribution) of sediments in Lake Maselgskoe is associated both with changes in sedimentation conditions and with processes of erosion of the esker ridge – the White Sea-Baltic watershed.

Keywords: Arkhangelsk Region; Kenozersky National Park; freshwater lakes; lake sediments; sulfur and iron compounds

For citation: Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Biogeochemical processes in sediments of lakes in the Kenozersky National Park. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 28–44. doi: 10.17076/lim1917

Funding. The study was carried out within state assignment to N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, UB RAS.

Введение

В современных условиях хозяйственной деятельности человека антропогенное воздействие на гидросферу стало сравнимым с естественными процессами в природе [Горюнова, 2006]. Природные процессы, приводящие к изменениям параметров воды, включают выветривание горных пород, суммарное испарение, выщелачивание из почвы, сток из-за гидрологических факторов и биологические процессы. Эти естественные процессы вызывают изменения pH и щелочности воды, а также загрузку фосфора, увеличение содержания фтора и высокие концентрации сульфатов. Преобразование водосборов, трансграничные потоки, атмосферные выпадения приводят к изменению геохимических циклов элементов в системе «водосбор – водоем», появлению токсичных компонентов в водной среде,

эвтрофированию. В настоящее время редко можно встретить водные объекты, не подверженные прямым или косвенным антропогенным изменениям [Хубларян и др., 2009].

В этой связи донные отложения (ДО) водоемов рассматриваются как носители информации об изменениях, имевших место на территории водосбора и в самом водоеме, как своеобразный архив данных о состоянии окружающей среды.

Формирование донных отложений озер происходит в результате сложного взаимодействия разнообразных природных процессов: климатических, гидрологических, физических, химических и биологических, протекающих во времени как на водосборной площади, так и в самом озере. История веществ, внесенных с водосбора, складывается в самом водоеме по крайней мере из четырех хорошо различимых процессов. Первым является разнос

поступающего с суши материала и его ассимиляция водоемом. Второй процесс состоит в дифференциации внесенных веществ, то есть в отделении их друг от друга. Это обуславливается частично простым механическим разделением вещества по размерам частиц и по удельному весу (механическая дифференциация); частично химическим осаждением некоторых веществ, тогда как другие удерживаются в растворе (химическая дифференциация); и частично непосредственным извлечением определенных соединений организмами (биологическая дифференциация). На границе водной массы и дна происходит фиксация в осадок падающих сверху отдифференцированных компонентов и смешение их друг с другом, а также с веществами, выделенными бентосом. Ход механической дифференциации и ее закономерности находятся в теснейшей связи с рельефом котловины водоема и характером его гидродинамического режима [Страхов, 1993].

Гранулометрический состав ДО озерных экосистем является одним из основных параметров, характеризующих типы осадков, а также дающих возможность судить о механизме процесса седиментации и динамике водной среды [Субетто и др., 2009].

Донные отложения отражают интегрированную во времени сумму антропогенного воздействия на аквальные системы. Многие загрязняющие вещества депонируются в них, поэтому их содержание в ДО может рассматриваться в качестве информативного показателя состояния поверхностных вод [Даувальтер, Кашулин, 2013].

Реабилитация водных объектов (то есть целенаправленные мероприятия по их восстановлению) может быть эффективной только в том случае, если она строится на базе детального исследования процессов, протекающих в них [Горюнова, 2006].

Северные территории России в пределах бассейнов Балтийского, Баренцева и Белого морей насыщены огромным количеством больших и малых озер [Румянцев и др., 2010]. Сохранение озер северных территорий является одной из важнейших экологических задач, так как водные экосистемы Севера чрезвычайно ранимы, поскольку имеют низкую способность к самоочищению. В Архангельской области насчитывается более 200 тыс. озер, составляющих примерно 2 % площади области, многие из которых традиционно используются местным населением для рыболовства и водоснабжения.

Небольшие озера, не подвергшиеся прямо-му загрязнению, могут использоваться в качестве индикаторов естественных геохимических

условий водообразования, а также глобальных и региональных потоков загрязнения воздуха и потепления климата [Moiseenko et al., 2013].

Органическому веществу (ОВ) принадлежит важная роль в водных экосистемах. Оно является активным участником биогеохимических процессов, пищевых цепей, химического переноса и взаимодействия. Поступающее ОВ двойного генезиса – автохтонное при значительной продуктивности водоема и в основном трудно-минерализуемое, аллохтонное вещество взвесей – подвергается лишь частичной деструкции в водной толще и, опускаясь, приводит к осадконакоплению. В результате деятельности некоторых групп микроорганизмов органические вещества в грунтах подвергаются минерализации. Интенсивность и направленность этого процесса зависит от уровня трофии и миктичности водоема, определяющих, в свою очередь, кислородный режим, окислительно-восстановительные условия в водоеме и обеспеченность среды акцепторами электронов [Дзюбан, 2007, 2013]. При хорошей аэрации водной толщи, сопровождающейся проникновением кислорода в придонные слои, наблюдается аэробная минерализация органического вещества, осуществляющаяся химическим и микробиологическим путями. В условиях стагнации в нижних слоях воды и донных отложениях создаются анаэробные условия, тогда ОВ подвергается деструкции определенными видами бентосного микробного сообщества – броодильщиками, сульфатредукторами и метаногенами. Конечными продуктами анаэробной минерализации органического вещества в бескислородных зонах водоемов являются CO_2 , CH_4 и H_2S .

Роль процесса сульфатредукции, развивающегося вследствие как естественных, так и антропогенных причин, возрастает при аккумуляции биогенных веществ в придонных слоях водной толщи, что благоприятно для активизации биогеохимических процессов [Матвеев и др., 1990]. Усиливающаяся при этом продукция ОВ приводит к расходу кислорода на его окисление и развитию гипоксии (исчерпанию кислорода), что способствует активизации анаэробных процессов, в частности сульфатредукции. Трансформация сульфатов при возникновении застойных явлений под действием сульфатредуцирующих бактерий приводит в конечном итоге к появлению в донных отложениях сероводорода. В результате его преобразования в ДО накапливаются различные по устойчивости соединения восстановленной серы, по соотношению которых можно судить об активности протекания процесса.

Целью работы являлось изучение поведения элементов биогеохимического цикла серы в донных отложениях водоемов Кенозерского национального парка.

Материалы и методы

Кенозерский национальный парк (НП «Кенозерский») находится в юго-западной части Архангельской области на стыке Плесецкого и Каргопольского административных районов, его западная граница проходит по границе с Республикой Карелия (<http://www.kenozero.ru/o-parke/materialy/obshchaya-informatsiya/>). Он имеет уникальное расположение на границе Балтийского кристаллического щита и Русской платформы. По величине водосборной площади 90 % территории района относится к бассейну Белого моря и лишь 10 % к бассейну Балтийского. Граница водораздела проходит по поросшей лесом гряде Масельга [Природное..., 2002].

Каждый этап геологической истории Земли наложил свой отпечаток на ландшафты парка: древние тектонические разломы обусловили рисунок гидрографической сети, определили форму и размещение озер, а в четвертичное время ледник и талые ледниковые воды сгладили рельеф, размыли и перераспределили осадочные породы. Под воздействием неоднократно наступавших и отступавших ледников и морей в межледниковые периоды сформировались могучие толщи разнообразных пород, перекрывшие кристаллический фундамент. По совокупности влияния рельефообразующих факторов на территории парка выделяются структурно-денудационный, аккумулятивный и эрозионно-аккумулятивный типы рельефа.

Структурно-денудационный рельеф характерен для карбонатного плато с минимальной мощностью четвертичных отложений. Плато представляет собой плоскую равнину, сложенную по поверхности преимущественно ледниковыми валунными суглинками и песками. По нему разбросаны скопления валунов – следы деятельности ледников, неоднократно в течение миллиона лет покрывавших территорию парка [Природное..., 2002].

Объектами нашего исследования выступили озера Каргопольского сектора НП «Кенозерский», где проходит граница раздела бассейнов Белого и Балтийского морей.

Водосборы озер Масельгское, Пежихерье и Лекшмозеро сложены каменноугольными известняками, мергелями. Все эти коренные породы сверху закрыты плащом рыхлых четвертичных отложений, представленных в рай-

оне Лекшмозера карбонатной мореной. Котловины озер имеют ледниково-тектоническое происхождение.

Описание объектов исследования, станций отбора проб приведено в работе [Титова и др., 2023]. Отбор проб воды осуществлялся послойно горизонтальным батометром равномерно по всему водному столбу (6 горизонтов). Глубоководные станции отбора образцов на оз. Масельгское, Пежихерье, Лекшмозеро обозначены как MG, PG, LG соответственно. Температура и содержание кислорода были измерены начиная подо льдом и до дна через 0,5 м с помощью портативного оксиметра HQ30D.99 Nach Lange с люминесцентным датчиком LDO.

Пробы болотной воды отбирались в болоте на водосборе оз. Масельгское (рядом с ним) пластиковой емкостью объемом 0,5 л.

Отбор почв осуществляли согласно ГОСТ [1984] почвенным буром с интервалом 20 см сотрудники (тогда ИЭПС) Н. А. Рубцова, К. В. Титова, Е. А. Вахрамеева.

Пробы донных отложений отбирались в марте 2022 года послойно с помощью прямоточной гравитационной трубки (Aquatic Research Instruments) с внутренним диаметром 50 мм, длиной 60 см, дискретность отбора проб 3–5 см (для выполнения геохимических анализов). Всего в 2022 году отобрано по две колонки ДО рядом друг с другом на каждом из озер: одна – для определения гранулометрического и элементного состава, другая – для остальных геохимических анализов. Максимальная глубина отбора составляла 46–56 см. Отложения незамедлительно упаковывались в полиэтиленовые пакеты с максимально возможным удалением из них воздуха с целью предотвращения окислительных процессов. Определение гранулометрического состава донных осадков проводили с дополнительной обработкой ультразвуком для механического диспергирования осадка [Heiri et al., 2001; МИ № 88-16365-010-2017]. Перед проведением анализа пробы естественной влажности подвергали замачиванию в дистиллированной воде и термической обработке (кипячению с дистиллированной водой). Далее на первом этапе методом мокрого просеивания определяли содержание песчаных фракций с размером частиц > 0,1 мм. Затем методом пипеточного анализа определяли содержание мелкоалевритовых фракций размером от 0,05 до 0,01 мм и пелитовых фракций с размером частиц от 0,01 до 0,005; от 0,005 до 0,001 и < 0,001 мм. Содержание крупноалевритовых фракций с размером частиц от 0,1 до 0,05 мм устанавливали расчетным путем. Расчет содержания фракций проводили

на абсолютно сухую навеску образца. Определение общего и органического углерода и азота выполняли методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на С,Н,N-анализаторе фирмы «Hewlett-Packard» [Гельман и др., 1987]. Разделение продуктов пиролиза проводили на медной колонке, заполненной Порапаком-Q, с последующим детектированием по теплопроводности. Расчет процентного содержания органического углерода и органического азота в анализируемой пробе осуществляли с использованием градуировочных коэффициентов стандартных образцов. Определение реакционноспособных форм железа (II и III) проводили после извлечения их из осадка 3,5 N серной кислотой [Соколов, 1980]. Железо Fe(II) определяли в аликвоте раствора титрованием $K_2Cr_2O_7$, железо Fe(III) – из другой аликвоты – титрованием $Na_2S_2O_3$ выделившегося I_2 после обработки KI. Содержание сульфидного железа рассчитывали по данным для сульфидной серы, исходя из формулы FeS; пиритное железо ($Fe_{\text{пирит}}$) – по содержанию пиритной серы. Содержание реакционноспособного железа ($Fe_{\text{реакц}}$) получали в результате сложения вышеперечисленных форм: $Fe_{\text{реакц}} = Fe(II) + Fe(III) + Fe_{\text{сульфид}} + Fe_{\text{пирит}}$. Определение различных форм серы проводили по методике, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Волков, Жабина, 1980]. Методика предусматривает определение сульфидной, элементной, пиритной и органической форм серы из одной навески донных осадков. Серу кислоторастворимых сульфидов определяли, обрабатывая навеску донных отложений натуральной влажности разбавленной соляной кислотой с нагреванием до кипения и одновременной отдувкой инертным газом выделяющегося сероводорода. Окончание определения в зависимости от количества образующегося сероводорода йодометрическое или фотометрическое. Для определения сульфатной серы использовали фильтрат, полученный после определения сульфидной серы. Сульфаты осаждали в виде $BaSO_4$ и после прокалывания при 800–850 °С определяли гравиметрически. Далее осадок экстрагировали ацетоном в аппарате Сокслета. Для определения элементной серы аликвотную часть экстракта обрабатывали раствором $CrCl_2$, отгоняя инертным газом выделяющийся в результате реакции сероводород. Окончание определения фотометрическое в виде метиленового синего. В осадке после экстракции определяли пиритную серу после восстановления ее раствором $CrCl_2$ до H_2S , количество которого устанавливали

методом объемного йодометрического титрования. Оставшийся после определения пиритной серы осадок отмывали от ионов хрома, подвергали исчерпывающему окислению, переводя органическую серу в сульфат, количество которого определяли гравиметрически. Методом ICP-MS спектрометрии установлено содержание микроэлементов (Cr, V, Co, Ni, Bi, Sb, Tl, Cu, Zn, As, Cd, Pb). Для выявления вклада литогенного, антропогенного или биогенного источников вещества донных отложений был вычислен коэффициент обогащения (КО). Он рассчитывался как отношение: элемент к скандию в пробе / элемент к скандию в земной коре.

Результаты и обсуждение

Проведенные в 2022 году гидрохимические исследования показали, что все глубоководные станции исследованных нами озер были стратифицированы по содержанию кислорода (снижение от поверхности ко дну с появлением анаэробных условий). Во всех озерах распределение сульфатов в воде показывает некоторое снижение концентраций к придонным слоям, за исключением оз. Пежихерье. Для всех озер наблюдалось увеличение количества углерода от поверхностных слоев к придонным (в мг/л): от 5 до 9 (среднее содержание 4,50) – оз. Лекшмозеро, от 8 до 12 (9,48) – оз. Масельгское, от 9 до 12 (9,87) – оз. Пежихерье. Концентрации растворенного железа для всех озер в аэробной зоне были небольшими и не превышали 400 мкг/л, при этом в анаэробной зоне количество железа резко возрастало и практически на 100 % было представлено восстановленной его формой. Максимальное количество железа зафиксировано для придонного слоя оз. Масельгское – до 17 000 мкг/л. В оз. Пежихерье содержание железа в придонном слое достигало 5500 мкг/л. В оз. Лекшмозеро концентрация растворенного железа достигала значений 1250 мкг/л. По максимальному содержанию общего азота в зимний период (мкг/л) озера можно охарактеризовать по уровню трофности как α -мезотрофные (650–1300) – оз. Пежихерье (1100) и эвтрофные (1300–2600) – оз. Масельгское и Лекшмозеро (1500 и 1470). По усредненным значениям этого показателя озера относятся к мезотрофным водоемам [Титова и др., 2023].

Перед проведением анализов отобранные пробы донных отложений охарактеризованы визуально. Более однородными были осадки оз. Лекшмозеро, в оз. Масельгское состав сильно менялся по мере погружения в толщу.

Отложения оз. Масельгское от поверхности в глубь осадков изменялись от почти черного

ила с большой влажностью через переходный опесчаненный слой темно-коричневого ила до коричневого ила с меньшей влажностью. Примерно такое же изменение осадков отмечено и для оз. Пезихерье, исключением было отсутствие песка. В оз. Лекшмозеро отложения представляли собой темно-коричневый ил с серыми вкраплениями внутри.

Геохимические исследования начались с определения влажности осадков как показателя, который может зависеть от смены условий осадконакопления. Мы не приводим сравнения новых данных по ДО с ранее полученными, так как изменения показателей в них могут происходить не так быстро, как в водной толще.

Влажность является одним из наиболее важных параметров при исследовании донных отложений водоемов. Низкие значения обнаруживаются на мелководных участках, где в результате волновой деятельности часто доминирует крупнозернистый материал, и в акваториях водоемов, примыкающих к приустьевым участкам рек, где также откладывается главным образом крупнозернистый материал вследствие высокой скорости потока на этих участках. Наибольшие значения влажности характерны для глубоководных частей озера [Даувальтер, 2012].

Осадки исследуемых озер были обводнены, среднее значение влажности ДО (%) составляло: оз. Масельгское – 90,91 % (изменялось от поверхности в толщу отложений от 97,30 до 89,56 %), оз. Пезихерье – 92,21 % (изменялось от 97,26 до 89,74 %), оз. Лекшмозеро – 89,33 % (изменялось от 95,71 до 87,85 %). С увеличением

глубины донных отложений их влажность немного снижалась вследствие уплотнения под весом вышележащих слоев. Влажность связана с размером частиц и, следовательно, их сорбционной емкостью: пелитовые илы обладают наибольшей влажностью, песчаные и алевритовые осадки – меньшей. При проведении исследований мы отметили такую же зависимость гранулометрического состава отложений и их влажности. Отобранные отложения всех озер представлены в основном пелитовыми илами, что и обуславливает обводненность осадков. Наличие в большом количестве песчаной фракции в слое 21–24 см оз. Масельгское приводило к заметному снижению влажности осадков (рис. 1, а). Явно выраженного изменения гранулометрического состава не отмечено в отложениях озер Пезихерье и Лекшмозеро (рис. 1, б, в).

Как известно, поступление различных элементов в озеро возможно разными путями: выветриванием горных пород (железосодержащие минералы), из почв водосборных площадей, с атмосферными осадками и грунтовыми (подземными) водами [Мартынова, 2010]. В свою очередь, почвы первоначально «наследуют» минеральный состав горных пород. Со временем в результате физических, химических и биологических процессов происходит поэтапное почвообразование. На его протекание влияют климат, почвообразующие породы, рельеф местности и др. Для изучения влияния водосбора на воду и донные отложения исследуемых озер нами летом 2009 г. были отобраны почвы (рис. 2; табл. 1) и болотная вода.

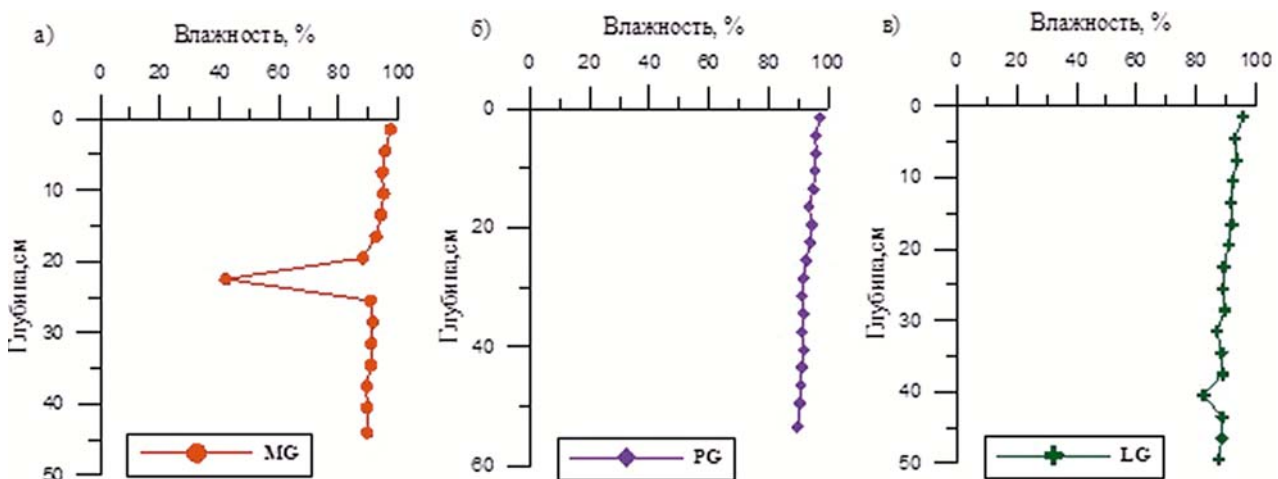


Рис. 1. Изменение влажности донных осадков озер. Здесь и на рис. 3–6: а) Масельгское; б) Пезихерье; в) Лекшмозеро
 Fig. 1. Changes in the humidity of lake bottom sediments. Here and in Fig. 3–6: а) Masel'skoe; б) Pezhikherie; в) Lyokshmozero

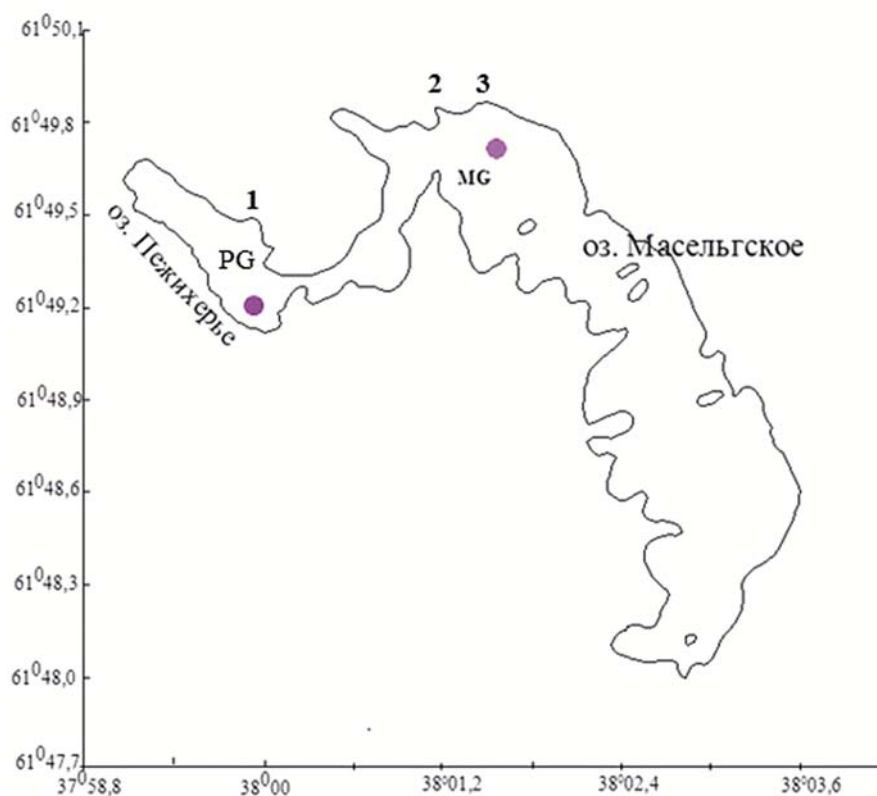


Рис. 2. Отбор проб почв на водосборе оз. Масельгское и Пежихерье.

Участок 1: на территории бывшей деревни Гужово на берегу оз. Пежихерье (поле, заросшее травой); участок 2: в лесу на высоком берегу оз. Масельгское в северной части (лес первичный, преимущественно сосновый, на почве беломошник); участок 3: бывшая деревня Масельга между оз. Масельгское и Синее, на этом участке или рядом до 70-х годов была конюшня. Участок расположен в низине, выше лес, преимущественно сосновый; участок 4 (на карте не представлен): на берегу Саргозера – поле, заросшее травой, рядом заросли молодых лиственных деревьев (вторичный лес)

Fig. 2. Soil sampling in the catchment of Lakes Maselgskoe and Pezhikherie.

Plot 1: on the territory of the former village of Guzhovo on the shore of Lake Pezhikherie (a grassed field); plot 2: in the forest on the high shore of Lake Maselgskoe in the northern part (primary forest, mainly pine, white moss cover); plot 3: the former village of Maselga between Lakes Maselgskoe and Sinye, on this plot or nearby there was a stable until the 70s. The plot is located in a lowland, with a mostly pine forest above; plot 4 (not shown on the map): on the shore of Sargozero there is a grassed field, nearby there are thickets of young deciduous trees (secondary forest)

Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в пробах было незначительным, а азот ($N_{\text{орг}}$) практически отсутствовал (менее 0,01 %). Наибольшее количество $C_{\text{орг}}$ отмечено для верхних горизонтов с растительными остатками или травой. В каждом последующем горизонте его содержание снижалось (табл. 1).

Образцы, отобранные на водосборе оз. Масельгское, представлены песком от светло-желтого до охристого оттенка с древесными остатками и мелкими камешками. Рыжий цвет почв может указывать на наличие соединений железа (III) и на аэрируемость этих песчаных почв, так как оглеенные почвы имеют холодные сизоватые цвета. Содержание реакционноспо-

собного (подвижного) железа изменялось в почвах участка 1 от 270 до 500 мг/кг, участков 2 и 3 – от 1000 до 1400 мг/кг, участка 4 – от 200 до 570 мг/кг. Для сравнения: тот же показатель в поверхностном слое незагрязненных почв вблизи г. Архангельска, также расположенного в зоне средней тайги, составляет от 100 до 500 мг/кг при усредненном значении для природных почв 186 мкг/кг в этом районе [Евдокимова и др., 2012]. То есть запасы наиболее активной формы железа в почвах исследуемого нами водосбора в несколько раз больше, чем в почвах других территорий той же климатической зоны. Возможно, это является одной из причин высокого количества железа в ДО

Таблица 1. Характеристика отобранных проб почв

Table 1. Characteristics of the soil samples

Участок Plot	Горизонт, см Horizon, cm	pH	Степень кислотности Acidity level	C _{орг}	N _{орг}	Уровень содержания органического вещества Organic matter level
1	0–20	6,58	нейтральная neutral	2,34	0,13	низкий low
	20–40	6,73		3,09	0,14	низкий low
	40–60	6,73		1,51	0,03	очень низкий very low
	60–80	6,83		1,41	0,01	
	80–100	7,02		0,15	0	
2	0–20	5,06	кислая acidic	1,11	0	очень низкий very low
	20–40	5,20	слабокислая slightly acidic	0,93	0	
	40–60	5,41		0,67	0	
	60–80	5,44		0,49	0	
3	0–20	6,54	нейтральная neutral	0,95	0	очень низкий very low
	20–40	6,36	слабокислая slightly acidic	0,72	0	
	40–60	6,37		-	-	
	60–80	6,32		-	-	
	80–90	6,12		-	-	
4	0–20	7,04	нейтральная neutral	2,89	0	низкий low
	20–40	6,90		1,14	0	очень низкий very low
	40–60	7,14		0,91	0	
	60–80	7,08		0,57	0	
	80–90	6,92		0,43	0	

Примечание. «-» – нет данных.

Note. «-» – no data.

оз. Масельгское, а также довольно значимой величины растворенного железа в болотной воде – 12 мг/л. Для сравнения: концентрация железа в воде озер Карелии – от 0,03 до 3,2 мг/л [Лозовик и др., 2006]; в карельских марциальных водах содержание этого элемента – от 14 до 106 мг/л [Токарев и др., 2015].

В связи с почвенным подзолообразовательным процессом, распространенным, например, в соседней Карелии, во время которого вымываемые из почв железо и алюминий поступают в озера в виде гидрокарбоната, сульфата и сульфидов железа, железа с органическими кислотами и в форме гидрозоль оксида железа и алюминия, в озерах и болотах образуются руды. В озерной воде под действием грибов, бактерий и низших водорослей происходит распад гидрокарбонатов, выпадение нерастворимого гидроксида железа и коагуляция гидрозоль в гели, а из сульфатов и сульфидов железа выделяется гидрат оксида железа. При этих процессах отлагается озерная руда – лимонит ($Fe_2O_3 \times H_2O$) с примесью фосфора, марганца и минеральных зерен. Озерная железная руда представляет собой скопление бурого железняка – лимонита в виде шариков, лепешек, монет. Встречается в рассеянном состоянии в песках, сапропелях и

других донных осадках. Озерные руды в Карелии распространены весьма широко и с начала XVIII века использовались в металлургической промышленности (г. Петрозаводск) [Шелехова и др., 2020]. Болотная руда образуется путем отложения бурого железняка (лимонита) на дне болот в виде конкреций (бобовин), твердых корок и слоев. Болотные железные руды накапливаются за счет соединений железа, растворенных в грунтовых водах. В восстановительной среде торфяника железо выпадает в осадок в виде карбоната (сидерита), который, окисляясь кислородом воздуха, переходит в оксиды и гидроксиды. Болотные железные руды скапливаются, образуя залежи. Характерным признаком для всех месторождений и проявлений болотных и озерных железных руд является их залегание в прибрежной полосе озер и заболоченных водоемов шириной до 300 м с мощностью залежей 0,15–1 м под слоем торфа и почв от 1 до 5 м. В донных залежах они перекрыты илистым грунтом мощностью 0,3–0,5 м. Время образования этих руд относится к четвертичному периоду – к постледниковой эпохе [Кулешевич, Лавров, 2010; Кулешевич и др., 2010]. О наличии рудных залежей в районе исследования свидетельствует источник «О добыче железной руды в Хергозерском и Лекшмозерском

приходах: из журн. Каргоп. уездного зем. собр. от 27 сент. 1869 г.»: «В Хергозерском и Лекшмозерском приходах крестьяне до 1855 г. добывали железную руду в разных болотистых местах... В зимнее время – до 3000 пудов, из которых выделяли железа до 200 пудов...» [Тормосова, 2011; Кенозерье..., 2012].

Таким образом, показано, что для территории соседнего региона, сходного с районом данного исследования по климатическим и геологическим факторам, образование различного типа железных руд – довольно распространенное явление. Почвы и болота водосборной площади оз. Масельгское аналогично могли быть источником поступления значительного количества железа в данный водоем.

После оседания поступивших веществ на дно начинаются процессы приспособления неустойчивых компонентов к новым условиям существования, иначе – процессы диагенеза, при этом малоустойчивые соединения заменяются более стойкими [Страхов, 1993].

Как известно, железо вносит заметный вклад в общее содержание элементов в донных осадках и активно участвует в биогеохимических циклах осадконакопления, а также определяет поведение многих других соединений [Розанов и др., 2006]. Железо четко реагирует на изменения окислительно-восстановительных условий и подвержено разнонаправленным переходам в системе «вода – донные отложения». Но вследствие неоднородности по природе и форме поступающих соединений не все железо вовлекается в обменные процессы. В диагенетических процессах на границе «вода-донные отложения» и в толще отложений принимает участие реакционноспособная

(легкоподвижная) часть общей массы элементов твердой фазы, способная в определенных физико-химических условиях либо к полному растворению, либо к переходу в более растворимые формы. По используемой нами методике мы определяем железо растворимых в разбавленной кислоте карбонатов, фосфатов, гидроксидов и сульфидов, а также расчетным путем – железо в составе пирита [Сokolov, 1980].

Содержание реакционноспособного железа ($Fe_{\text{реакц}}$) в донных отложениях оз. Масельгское в среднем составляло 9,81 % (в расчете на сухое вещество), изменяясь от 0,77 до 14,57 %; в оз. Пежихерье – 2,86 %, от 1,64 до 12,29 %; в оз. Лекшмозеро – 2,98 %, от 1,56 до 5,73 % (рис. 3).

В осадках всех изученных озер отмечена тенденция уменьшения концентрации реакционноспособного железа по мере погружения в их толщу. В отложениях оз. Пежихерье и Лекшмозеро наибольшее содержание этого компонента зафиксировано в поверхностных слоях, а в оз. Масельгское поверхностные слои содержали такое же количество железа, как и на глубине 25–35 см, максимум приходился на 12–15 см от поверхности. В отличие от двух других водоемов в осадках оз. Масельгское минимум железа наблюдался не в толще отложений на глубине 46–56 см, а в горизонте 21–24 см, что связано с изменением гранулометрического состава.

Как видно из рис. 4, доминирующей формой реакционноспособного железа в отложениях всех озер являлась окисленная ($Fe(III)$), по мере погружения в толщу увеличивался вклад восстановленной формы железа ($Fe(II)$).

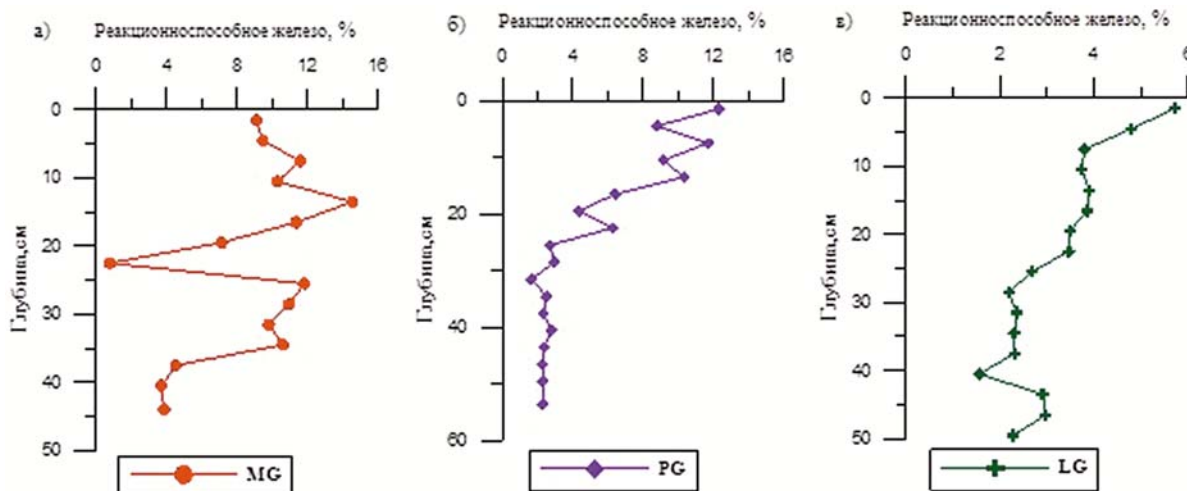


Рис. 3. Распределение содержания реакционноспособного железа в донных осадках озер

Fig. 3. Distribution of reactive iron content in bottom sediments of the lakes

В ДО оз. Масельгское (рис. 4, а) и Лекшмозеро (рис. 4, в) вклад восстановленной формы был больше по сравнению с осадками из оз. Пежихерье (рис. 4, б); в отложениях оз. Лекшмозеро ее величина достигала 60 %, в оз. Масельгское – 75 %.

Содержание железа также определено методами масс-спектрометрии в высушенных образцах донных отложений. Наибольшее значение этого показателя в ДО составляло: для оз. Масельгское – 6,65 %, оз. Пежихерье – 7,04 %, оз. Лекшмозеро – 3,92 %. Эти результаты подтвердили различие в содержании железа в оз. Масельгское/Пежихерье и Лекшмозеро. Различие в концентрациях железа, определенных двумя методами, связано с состоянием образцов – в первом случае анализировались пробы естественной влажности, во втором – высушенные образцы.

Для сравнения приведем содержание железа в донных отложениях различных водоемов Карелии: Онежское озеро – от 0,92 до 5,59 % [Белкина, Кулик, 2019]; Выгозерское водохранилище – от 1,00 до 9,7 % [Белкина и др., 2018]; Ладожское озеро (северная часть) – от 2,0 до 9,4 % [Белкина и др., 2015].

Общая сера включает в себя соединения восстановленной серы ($\Sigma\text{SH}_2\text{S}$) – продукты трансформации бактериального сероводорода, куда входят кислоторастворимые сульфиды (S^{2-}), элементарная (S^0), пиритная ($\text{S}_{\text{пирит}}$) сера,

также сера в составе органических соединений ($\text{S}_{\text{орг}}$) [Остроумов, 1953] и остаточные сульфаты (SO_4^{2-}) [Волков, 1984].

Как видно из данных рис. 5, наибольшее количество соединений серы отмечено в отложениях оз. Пежихерье, но в среднем общее их содержание (в расчете на сухое вещество) составляло 0,61 % (от 0,39 до 2,63 %); наименьшее – в отложениях оз. Лекшмозеро – 0,23 % (от 0,18 до 0,46 %); в отложениях оз. Масельгское – 0,76 % (от 0,14 до 1,37 %). Наблюдалось уменьшение содержания соединений серы от поверхностных горизонтов отложений в их толщу.

Общее количество соединений восстановленной серы, обусловленное в основном протеканием сульфатредукции, в осадках оз. Масельгское изменялось от 0,07 до 0,58 %; в осадках оз. Пежихерье – от 0,27 до 1,12 %; в осадках оз. Лекшмозеро – от 0,09 до 0,22 % (рис. 5). Минимальное количество соединений серы в отложениях оз. Масельгское обусловлено также изменением гранулометрического состава.

Доминирующей среди форм восстановленной серы в ДО всех исследованных озер была органическая составляющая (от $\Sigma\text{SH}_2\text{S}$): оз. Масельгское – от 40 до 66 %, оз. Пежихерье – от 76 до 93 %, оз. Лекшмозеро – от 54 до 87 %.

Органическое вещество, поступающее различными путями с водосбора или продуцируемое в самом водоеме, в результате химических, микробиологических процессов подвергается

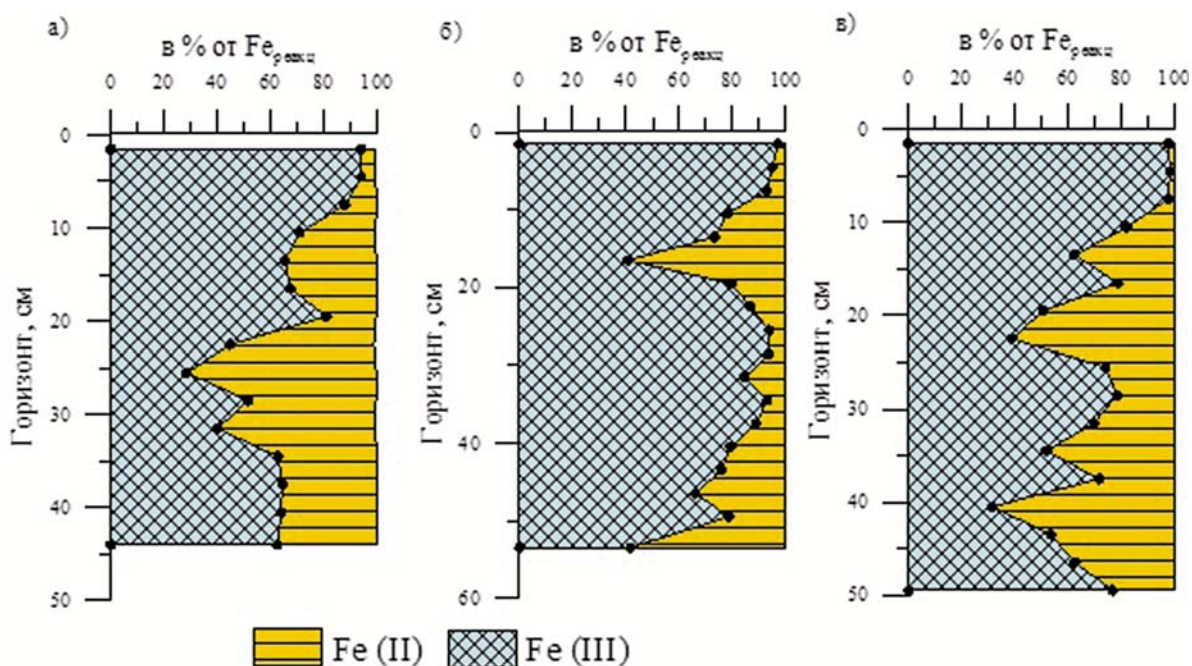


Рис. 4. Распределение форм реакционноспособного железа в донных осадках озер
Fig. 4. Distribution of forms of reactive iron in bottom sediments of the lakes

деструкции частично в водной толще озера, а в основном – в его донных отложениях. Таким образом, в ходе анализа ДО определяется еще не подвергшаяся деструкции часть органического вещества. Его содержание оценивалось по количеству органического углерода ($C_{орг}$). Остаточное количество ОВ было наибольшим в отложениях оз. Пижихерье, минимальным – в оз. Лекшозеро (рис. 6). В среднем этот показатель (в расчете на сухое вещество) в отложениях оз. Масельское составлял 14,88 %; оз. Пе-

жихерье – 19,18 %; оз. Лекшозеро – 9,93 %. Максимальные концентрации $C_{орг}$ выявлены в поверхностном слое ДО оз. Масельское/Пижихерье, которые по мере погружения в толщу осадков снижались, в оз. Лекшозеро наблюдалась тенденция увеличения содержания органического вещества. Количество неорганического углерода в отложениях исследуемых озер было намного меньше органической составляющей: в оз. Масельское в среднем 1,21 % (в расчете на

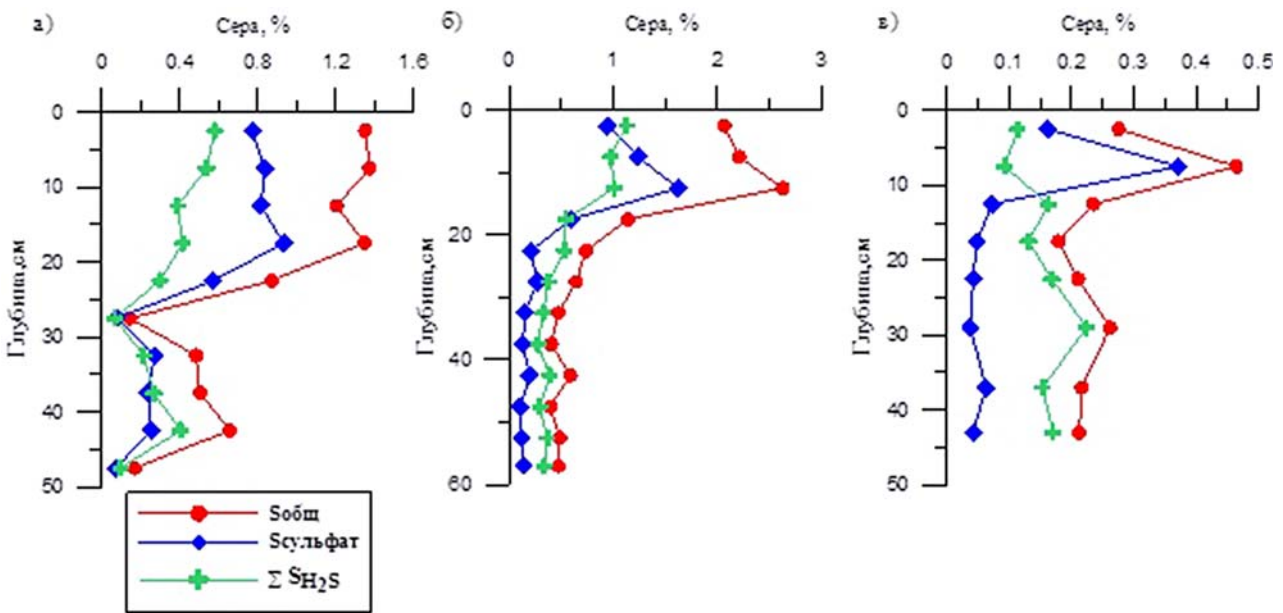


Рис. 5. Распределение содержания соединений серы в донных осадках озер

Fig. 5. Distribution of the content of sulfur compounds in bottom sediments of the lakes

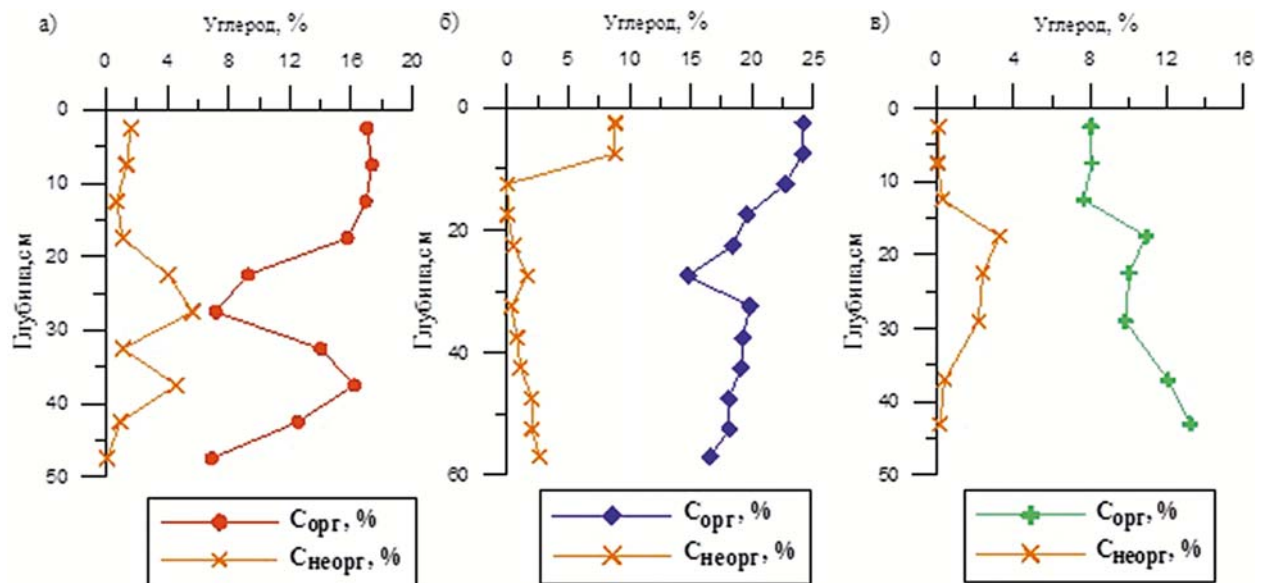


Рис. 6. Распределение содержания углерода в донных осадках озер

Fig. 6. Distribution of carbon content in bottom sediments of the lakes

поступают в результате глобального переноса (табл. 2).

Ни в одном образце ДО изученных водоемов концентрации Cr, V, Tl, Co, Ni, Cu не превышали установленные нормативы по КО, но существенен вклад Cd, Pb. В осадках всех исследованных озер был незначительно повышен КО для Zn, Bi, Sb. Поверхностные слои отложений оз. Лекшмозеро отличались значимым привнесом As в этот водоем. Если для сравнения использовать фоновые концентрации (в мг/кг) химических элементов в донных отложениях малых озер южной части Республики Карелия (73–76 образцов), в частности Cd (от 0,08 до 1,71) и Pb (от 0,7 до 21,3) [Шелехова и др., 2020], то по Cd во всех исследованных нами озерах эти величины не были превышены во всей толще ДО, за исключением одного характеристического горизонта; концентрации Pb в верхних слоях отмечены более высокие, чем в осадках озер соседнего региона. Для отложений оз. Масельгское и Пежихерье реперным был горизонт 15–18 см, для оз. Лекшмозеро – 12–15 см. Принимая во внимание скорость осадконакопления в оз. Пежихерье для слоя 0–9,5 см 4,1 мм/год, а для слоя 9,5–16 см 0,1 мм/год [Шевченко и др., 2021], можно установить, что образование этих слоев произошло в период до 1000 лет назад. Судя по тому, что слой отложений с максимальными концентрациями загрязнителей в оз. Лекшмозеро находится выше, чем в двух других озерах, скорость осадконакопления в данном водоеме немного меньше. Это связано с большими глубиной (до 25 м) и площадью озера.

Заключение

Донные отложения трех исследованных озер НП «Кенозерский» представлены в основном пелитовыми илами, что и обуславливало их значительную влажность (до 98 %). С увеличением глубины ДО влажность немного снижалась вследствие уплотнения под весом вышележащих слоев. Наличие в большом количестве песчаной фракции в слое 21–24 см оз. Масельгское приводило к заметному снижению влажности осадков. Явно выраженного изменения гранулометрического состава не отмечено в отложениях озер Пежихерье и Лекшмозеро.

Остаточное количество ОВ (органического углерода) было наибольшим в отложениях оз. Пежихерье, минимальным – в оз. Лекшмозеро. В среднем этот показатель в отложениях оз. Масельгское составлял (в расчете на сухое вещество) 14,88 %; оз. Пежихерье – 19,18 %; оз. Лекшмозеро – 9,93 %. Максимальные

концентрации $C_{орг}$ выявлены в поверхностном слое ДО оз. Масельгское/Пежихерье, которые по мере погружения в толщу осадков снижались, в оз. Лекшмозеро наблюдалась тенденция увеличения содержания органического вещества.

Количество неорганического углерода в отложениях исследуемых озер было намного меньше органической составляющей: в оз. Масельгское в среднем 1,21 % (в расчете на сухое вещество), в оз. Пежихерье – 1,39 %, оз. Лекшмозеро – 0,34 %.

Общее количество соединений восстановленной серы, обусловленное в основном протеканием сульфатредукции, в осадках оз. Масельгское изменялось от 0,07 до 0,58 %; в осадках оз. Пежихерье – от 0,27 до 1,12 %; в осадках оз. Лекшмозеро – от 0,09 до 0,22 %. Доминирующей среди форм восстановленной серы в ДО всех исследованных озер была органическая составляющая (в % от ΣSH_2S): оз. Масельгское – от 40 до 66, оз. Пежихерье – от 76 до 93, оз. Лекшмозеро – от 54 до 87. В осадках всех трех изученных озер отмечена тенденция уменьшения концентрации реакционноспособного железа по мере погружения в их толщу. В отложениях оз. Пежихерье и Лекшмозеро наибольшее содержание этого компонента зафиксировано в поверхностных слоях, а в оз. Масельгское поверхностные слои содержали такое же количество железа, как и на глубине 25–35 см, максимум же приходился на 12–15 см от поверхности.

Обнаруженные концентрации железа в почвах и болотной воде водосборов озер Масельгское и Пежихерье обуславливают повышенное содержание этого компонента в донных отложениях данных водоемов. Озерное и болотное железорудное образование характерно для водно-болотных угодий соседней Карелии.

Рассчитанные значения коэффициента обогащения донных отложений микроэлементами превышали нормативные величины по железу и марганцу для оз. Масельгское и Пежихерье до глубины отложений 18 см, что является очередным подтверждением значительного содержания железа в ДО этих водоемов. В осадках оз. Лекшмозеро КО по железу и марганцу были небольшими.

В отложениях исследованных озер обнаружены микроэлементы, которые поступают в результате глобального переноса. Ни в одном из образцов ДО концентрации Cr, V, Tl, Co, Ni, Cu не превышали установленные нормативы по коэффициентам обогащения, но существенен вклад Cd, Pb. В осадках всех исследованных озер был незначительно повышен КО для Zn, Bi, Sb.

Поверхностные слои отложений оз. Лекшмозеро отличались значимым привносом As в этот водоем. По абсолютному содержанию Cd во всех озерах эти величины не были превышены во всей толще, за исключением одного характеристического горизонта, но в верхних слоях отмечены более высокие, чем в осадках озер соседнего региона, концентрации Pb. Для отложений оз. Масельгское и Пижихерье реперным был горизонт 15–18 см, для оз. Лекшмозеро – 12–15 см.

Авторы благодарят руководителя национального парка «Кенозерский» Елену Флегонтовну Шатковскую за возможность проведения исследований и пользования ресурсами парка, а также его сотрудников А. В. Брагина, К. С. Воробьева, Е. Маринина за помощь в экспедиционных работах, Р. Б. Ивахнову за определение углерода в донных отложениях.

Литература

- Белкина Н. А., Ефременко Н. А., Кулик Н. В. Особенности миграции, трансформации и накопления железа в Выгозерском водохранилище // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 5. С. 505–513. doi: 10.1134/S0321059618050036
- Белкина Н. А., Кулик Н. В. Современные донные отложения Петрозаводской губы Онежского озера // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 1. С. 84–97. doi: 10.24411/2658-3569-2020-10003
- Белкина Н. А., Субетто Д. А., Ефременко Н. А., Потахин М. С., Кулик Н. В. Химический состав донных отложений северной части Ладожского озера как показатель многолетней изменчивости экосистемы водоема // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 53–61. doi: 10.17076/lim51
- Водяницкий Ю. Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. 164 с.
- Волков И. И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Волков И. И., Жабина Н. Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // Химический анализ морских осадков / Под ред. Э. А. Остроумова. М.: Наука, 1980. С. 5–27.
- Гельман Н. Э., Терентьева Н. А., Шанина Т. М. Методы количественного органического элементного микроанализа. М.: Химия, 1987. 296 с.
- Горюнова С. В. Закономерности процесса антропогенной деградации водных объектов: Дис. ... докт. биол. наук. М., 2006. 388 с.
- ГОСТ 17.4.4.02-84. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Государственный комитет СССР по стандартам. М., 1986. 8 с. (в настоящее время не действует).
- Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Долговременные изменения химического состава донных отложений озера Имандра в зоне влияния стоков Кольской атомной электростанции // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. Вып. № 3(16). С. 6–35.
- Дзюбан А. Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. СПб., 2007. 50 с.
- Дзюбан А. Н. Функционирование микробных сообществ донных отложений водоемов как фактор формирования качества водной среды // Вода. Химия и экология. 2013. № 6. С. 57–62.
- Евдокимова В. П., Попова Л. Ф., Тюлева В. В., Бечина И. Н., Усачева Т. В. Особенности накопления железа и марганца в почвах городов архангельской промышленной агломерации // Вестник МГОУ. Серия Естественные науки. 2012. № 4. С. 99–104.
- Кенозерье: библиографический указатель / Сост. М. А. Смирнова; консультант М. Н. Мелютина. Архангельск, 2012. 238 с.
- Кулешевич Л. В., Лавров О. Б. Горные и рудные промыслы Карелии (историко-геологический туризм) // Роль туризма в модернизации экономики российских регионов: Сб. науч. статей по мат-лам междунар. науч.-практич. конф. (Петрозаводск-Кондопога, 8–10 июня 2010 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 278–280.
- Кулешевич Л. В., Ларькина Н. Ю., Инина И. С. Минералы железа в коллекции музея геологии докембрия: лимонитовые и гематитовые руды Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2010. Вып. 13. С. 131–139.
- Лозовик П. А., Шкиперова О. Ф., Зобков М. Б., Платонов А. В. Геохимические особенности поверхностных вод Карелии и их классификация по химическим показателям // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 9. С. 130–143.
- Мартынова М. В. Формы нахождения соединений железа в пресноводных отложениях (аналитический обзор) // Водные ресурсы. Качество и охрана вод, экологические аспекты. 2010. Т. 37, № 4. С. 452–460.
- Матвеев А. А., Кучинскене А. А., Резников С. А. Об интенсивности процесса сульфатредукции в донных отложениях Ладожского озера // Гидрохимические материалы. Т. CVIII. Формирование гидрохимического и гидробиологического режима водных объектов и вынос химических веществ реками. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 153–157.
- МИ № 88-16365-010-2017. Донные отложения водоемов. Определение гранулометрического состава ситовым и пипеточным методами: методика; введена 26.12.2017. Архангельск, 2017. 12 с.
- Остроумов Э. А. Метод определения форм восстановленной серы в отложениях Черного моря // Труды Ин-та океанологии АН СССР. 1953. Т. 7. С. 57–69.
- Розанов А. Г., Волков И. И., Кокрятская Н. М., Юдин М. В. Марганец и железо в Белом море: осадконакопление и диагенез // Литология и полезные ископаемые. 2006. № 5. С. 539–558.
- Румянцев В. А., Кудерский Л. А. Ладожское озеро: общая характеристика, экологическое состояние // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2010. № 1. С. 171–182.

Соколов В. С. Определение реакционноспособных форм железа и марганца в морских осадках // Химический анализ морских осадков / Под ред. Э. А. Остроумова. М.: Наука, 1980. С. 28–41.

Страхов Н. М. Избранные труды. Осадкообразование в современных водоемах. М.: Наука, 1993. 396 с.

Страхов Н. М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 1976. 159 с.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции: Научная монография. СПб: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 339 с.

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

Токарев И. В., Бородулина Г. С., Блаженникова И. В., Авраменко И. А. Условия формирования железистых минеральных вод по изотопно-геохимическим данным (курорт «Марциальные воды», Карелия) // Геохимия. 2015. № 1. С. 88–91. doi: 10.7868/S0016752514110090

Тормосова Н. И. Каргополье: история исчезнувших волостей. Каргополь: Каргопольский музей, 2011. 711 с.

Хубларян М. Г., Моисеенко Т. И. Качество воды // Вестник Российской академии наук. 2009. Т. 79, № 5. С. 404–410.

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.

Шевченко В. П., Алиев Р. А., Кокрятская Н. М., Стародымова Д. П., Субетто Д. А., Травкина А. В., Чулаков А. В. Pb-210 и Cs-137 в донных осадках малых озер севера европейской части России // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Мат-лы VI Междунар. конф. В 2-х томах. Т. 1. Томск: ТПУ, 2021. С. 621–625.

Шевченко В. П., Любас А. А., Стародымова Д. П., Болотов И. Н., Аксенова О. В., Алиев Р. А., Гофоров М. Ю., Игловский С. А., Кокрятская Н. М. Особенности геохимии тяжелых металлов в донных осадках малых озер урочища Пымвашор (Большеземельская тундра) // Успехи современного естествознания. 2017. № 1. С. 105–110.

Шелехова Т. С., Слуковский З. И., Лаврова Н. Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 111 с.

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // *J. Paleolimnol.* 2001. Vol. 25. P. 101–110. doi: 10.1023/A:1008119611481

Moiseenko T. I., Gashkina N. A., Dinu M. I., Kremleva T. A., Khoroshavin V. Yu. Aquatic geochemistry of small lakes: Effects of environment changes // *Geochem. Int.* 2013. Vol. 51. P. 1031–1148. doi: 10.1134/S0016702913130028

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise Geochem.* 2003. Vol. 3. P. 1–64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4

Vinogradova A., Kotova E., Topchaya V. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia // *Geography and Natural Resources.* 2017. No. 38(1). P. 78–85. doi: 10.1134/S1875372817010103

References

Belkina N. A., Efremenko N. A., Kulik N. V. Specifics of iron migration, transformation, and accumulation in the Vygozero reservoir. *Water Resources.* 2018;45(5): 738–745. doi: 10.1134/S0097807818050032

Belkina N. A., Kulik N. V. Modern bottom sediments in Petrozavodsk Bay of Lake Onego. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii «Integral» = International Journal of Applied Sciences and Technologies 'Integral'.* 2019;1:84–97. (In Russ.) doi: 10.24411/2658-3569-2020-10003

Belkina N. A., Subetto D. A., Efremenko N. A., Potakhin M. S., Kulik N. V. The chemical composition of bottom sediments in northern Lake Ladoga as an indicator of long-term variations in the lake ecosystem. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2015;9:53–61. (In Russ.) doi: 10.17076/lim51

Dauvalter V. A. Geoecology of bottom sediments. Murmansk: MSTU; 2012. 242 p. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Long-term changes in the chemical composition of the Lake Imandra sediments within the zone of waste water influence of the Kola Nuclear Power Plant. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Scientific Center RAS.* 2013;3(16):6–35. (In Russ.)

Dzyuban A. N. Destruction of organic matter and the methane cycle in bottom sediments of inland water bodies: Summary of DSc (Dr. of Biol.) thesis. St. Petersburg; 2007. 50 p. (In Russ.)

Dzyuban A. N. Functioning of microbial communities of bottom sediments as a factor of quality of the water ecosystem. *Voda. Khimiya i ekologiya = Water. Chemistry and Ecology.* 2013;57–62. (In Russ.)

Evdokimova V. P., Popova L. F., Tyuleva V. V., Bechina I. N., Usacheva T. V. Features of the accumulation of iron and manganese in the soils of the cities of the Arkhangelsk industrial agglomeration. *Vestnik MGOU. Seriya «Estestvennyye nauki» = Bulletin MSRU. Ser. Natural Sciences.* 2012;4:99–104. (In Russ.)

Gelman N. E., Terent'eva N. A., Shanina T. M. Methods of quantitative organic elemental microanalysis. Moscow: Khimiya; 1987. 296 p. (In Russ.)

Goryunova S. V. Patterns of the process of anthropogenic degradation of water bodies: DSc (Dr. of Biol.) thesis. Moscow; 2006. 388 p. (In Russ.)

GOST 17.4.4.02-84. Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis. USSR State Committee for Standards, Moscow; 1986. 8 p. (currently not valid). (In Russ.)

Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* 2001;25:101–110. doi: 10.1023/A:1008119611481

Khublaryan M. G., Moiseenko T. I. Water quality. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2009;79(3): 230–236. doi: 10.1134/S1019331609030058

Kuleshevich L. V., Lar'kina N. Yu., Inina I. S. Iron minerals in the collection of the Museum of the Precambrian Geology: limonite and hematite ores of Karelia. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Minerals of Karelia*. 2010;13:131–139. (In Russ.)

Kuleshevich L. V., Lavrov O. B. Mining and ore industries of Karelia (historical and geological tourism). *Rol' turizma v modernizatsii ekonomiki rossiiskikh regionov: Sb. nauch. statei po mater. mezhdunar. nauch.-praktich. konf. (Petrozavodsk - Kondopoga, 8–10 iyunya 2010 g.) = The role of tourism in the modernization of the economy of the Russian regions. Proceed. int. scientific and practical conf. (Petrozavodsk - Kondopoga, June 8–10, 2010)*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. P. 278–280. (In Russ.)

Lozovik P. A., Shkiperova O. F., Zobkov M. B., Platonov A. V. Geochemical properties of Karelian surface water and their classification by chemical parameters. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2006;9: 130–143. (In Russ.)

Martynova M. V. Iron compound occurrence forms in freshwater deposits: Analytical review. *Water Resources*. 2010;37(4):488–496. doi: 10.1134/S0097807810040081

Matveev A. A., Kuchinskene A. A., Reznikov S. A. On the intensity of the sulfate reduction process in bottom sediments of Lake Ladoga. *Gidrokhimicheskie materialy. T. CVIII. Formirovanie gidrokhimicheskogo i gidrobiologicheskogo rezhima vodnykh ob'ektov i vynos khimicheskikh veshchestv rekami = Hydrochemical materials. Vol. CVIII. Formation of the hydrochemical and hydrobiological regime of water bodies and the removal of chemicals by rivers*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1990. P. 153–157. (In Russ.)

MI No. 88-16365-010-2017. Bottom sediments of reservoirs. Determination of particle size distribution using sieve and pipette methods: methodology: introduced 12.26.2017. Arkhangel'sk; 2017. 12 p. (In Russ.)

Moiseenko T. I., Gashkina N. A., Dinu M. I., Kremleva T. A., Khoroshavin V. Yu. Aquatic geochemistry of small lakes: Effects of environment changes. *Geochem. Int.* 2013;51:1031–1148. doi: 10.1134/S0016702913130028

Ostroumov E. A. Method for determining the forms of reduced sulfur in sediments of the Black Sea. *Trudy In-ta okeanologii AN SSSR = Proceedings of the Institute of Oceanology of the USSR Academy of Sciences*. 1953;7:57–69. (In Russ.)

Rozaev A. G., Volkov I. I., Kokryatskaya N. M., Yudin M. V. Manganese and iron in the White Sea: sedimentation and diagenesis. *Litologiya i poleznye iskopaemye = Lithology and Minerals*. 2006;5:539–558. (In Russ.)

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise Geochem.* 2003;3:1–64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4

Rumyantsev V. A., Kudersky L. A. Lake Ladoga: general characteristics, ecological state. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye (Terra Humana) = Society. Environment. Development (Terra Humana)*. 2010;1:171–182. (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.)

Shelekhova T. S., Slukovsky Z. I., Lavrova N. B. Methods for studying bottom sediments of lakes in Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 111 p. (In Russ.)

Shevchenko V. P., Aliev R. A., Kokryatskaya N. M., Starodymova D. P., Subetto D. A., Travkina A. V., Chupakov A. V. Pb-210 and Cs-137 in bottom sediments of small lakes in the north of the European part of Russia. *Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: Mat-ly VI Mezhdunar. konf. = Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proceed. VI int. conference. Vol. 1. Tomsk: TPU; 2021. P. 621–625. (In Russ.)*

Shevchenko V. P., Lyubas A. A., Starodymova D. P., Bolotov I. N., Akseonova O. V., Aliev R. A., Gofarov M. Yu., Iglovsky S. A., Kokryatskaya N. M. Features of the geochemistry of heavy metals in bottom sediments of small lakes in the Pymvashor tract (Bolshezemelskaya tundra). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Modern Natural Science*. 2017;1:105–110. (In Russ.)

Smirnova M. A. (comp.), Melyutina M. N. (consult.). Kenozerye: a bibliographic index. Arkhangel'sk; 2012. 238 p. (In Russ.)

Sokolov V. S. Determination of reactive forms of iron and manganese in marine sediments. *Khimicheskii analiz morskikh osadkov = Chemical analysis of marine sediments*. Moscow: Nauka; 1980. P. 28–41. (In Russ.)

Strakhov N. M. Issues of geochemistry of modern oceanic lithogenesis. Moscow: Nauka; 1976. 159 p. (In Russ.)

Strakhov N. M. Selected works. Sedimentation in current reservoirs. Moscow: Nauka; 1993. 396 p. (In Russ.)

Subetto D. A. Bottom sediments of lakes: Paleolimnological reconstructions: Scientific monograph. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena; 2009. 339 p. (In Russ.)

Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Popov S. S., Moreva O. Yu., Bragin A. V. Studying the process of sulfate reduction in the water of lakes in the Kenozersky National Park. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2023;6:53–65. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1744

Tokarev I. V., Borodulina G. S., Blazhennikova I. V., Avramenko I. A. Conditions for the formation of ferruginous mineral waters according to isotope-geochemical data (Marcial Waters resort, Karelia). *Geokhimiya = Geochemistry*. 2015;1:88–91. (In Russ.) doi: 10.7868/S0016752514110090

Tormosova N. I. Kargopol'ye: the history of the disappeared volosts. Kargopol': Kargopol'skii muzei; 2011. 711 p. (In Russ.)

Vinogradova A., Kotova E., Topchaya V. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia. *Geography and Natural Resources*. 2017;38(1):78–85. doi: 10.1134/S1875372817010103

Vodyanitsky Yu. N. Heavy metals and metalloids in soils. Moscow: Pochvennyi institut im. V. V. Dokuchaeva RASKhN; 2008. 164 p. (In Russ.)

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

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

Поступила в редакцию / received: 17.05.2024; принята к публикации / accepted: 22.08.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Титова Ксения Владимировна

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

e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Кокрятская Наталья Михайловна

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

e-mail: nkokr@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Titova, Ksenia

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Kokryatskaya, Natalia

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

УДК 502.17

ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ВОДЕ ОЗЕР, НАХОДЯЩИХСЯ НА РАЗНОЙ СТАДИИ ОТДЕЛЕНИЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ

Е. С. Колпакова*, **А. В. Вельямидова**, **Т. А. Королева**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (пр. Никольский, 20,
Архангельск, Россия, 163020), *kolpelen@yandex.ru*

Представлены данные о содержании и происхождении хлорорганических соединений (хлорфенольных соединений и летучего хлороформа) в водоемах со стратифицированной водной толщей. Проведены рекогносцировочные обследования малых прибрежных озер, расположенных в Кандалакшском заливе Белого моря в районе Беломорской биологической станции имени Н. А. Перцова Биологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (Лоухский район, Республика Карелия). Объектами исследования выбраны озера, находящиеся на разной стадии отделения от моря: Нижнее Ершовское, Трехцветное и Большие Хрусломены. Выявлено значительное содержание хлорфенольных соединений в воде, главным образом в придонных слоях соленых меромиктических озер (до 49,9 мкг/дм³). Хлорфенольные соединения представлены преимущественно моно- и трихлорфенолами. Концентрации хлороформа составляли от 0,06 до 0,99 мкг/дм³. Установлено, что компонентный состав хлорорганических соединений в воде обследованных озер, не подверженных прямому антропогенному воздействию, обусловлен преимущественно природными источниками их образования. В соленых водах в сильно восстановительных условиях выявлено снижение активности природных процессов хлорирования органического вещества и увеличение продуктивности процессов восстановительного дехлорирования хлорфенольных соединений с участием анаэробных микроорганизмов.

Ключевые слова: хлорфенольные соединения; хлороформ; меромиктические озера; вода; газовая хроматография

Для цитирования: Колпакова Е. С., Вельямидова А. В., Королева Т. А. Хлорорганические соединения в воде озер, находящихся на разной стадии отделения от Белого моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 45–52. doi: 10.17076/lim1910

E. S. Kolpakova*, A. V. Velyamidova, T. A. Koroleva. ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN THE WATER OF LAKES AT DIFFERENT STAGES OF ISOLATION FROM THE WHITE SEA

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

The article presents data on the content and origin of organochlorine compounds (chlorophenolic compounds and volatile chloroform) in stratified water bodies. We carried out a reconnaissance survey of small coastal lakes in the Gulf of Kandalaksha, White Sea (Loukhsky District, Republic of Karelia), not far from the White Sea Biological Station of the Faculty of Biology of the Lomonosov Moscow State University. The study objects were lakes Nizhneye Yershovskoye, Tryokhtsvetnoye, and Bol'shie Khruslomeny, which are currently in different phases of isolation from the sea. A significant content of chlorophenolic compounds in water (up to 49.9 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$), mainly in the bottom layers of saline meromictic lakes, was determined. Chlorophenolic compounds were represented mainly by mono- and trichlorophenols. Chloroform concentrations ranged from 0.06 to 0.99 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$. It has been established that the composition of organochlorine compounds in water of the studied lakes, which are not exposed to direct human impact, was primarily determined by natural sources of these compounds. In the highly reduced conditions of saline lake waters there occurred a decrease in the activity of natural processes of organic matter chlorination with a simultaneous increase in the productivity of reductive dechlorination of chlorophenolic compounds involving anaerobic microorganisms.

Keywords: chlorophenolic compounds; chloroform; water; meromictic lakes; gas chromatography

For citation: Kolpakova E. S., Velyamidova A. V., Koroleva T. A. Organochlorine compounds in the water of lakes at different stages of isolation from the White Sea. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 45–52. doi: 10.17076/lim1910

Введение

Одним из важных показателей экологического состояния природных экосистем является присутствие хлорорганических соединений (ХОС), происхождение и накопление которых ранее связывали только с техногенными факторами. В настоящее время довольно широко распространено мнение, что ХОС образуются также и естественным путем – в результате хлорирования органического вещества при взаимодействии с хлорид-ионами и в процессах ферментативного продуцирования [Watts et al., 2004; Gribble, 2010; Field, 2016]. К типичным представителям таких ХОС можно отнести обширную группу хлорфенольных соединений (ХФС) и хлороформ.

ХФС являются ионогенными соединениями с разной степенью гидрофобности, липофильности и кислотности. Одним из крупных биогенных источников этих соединений являются морские экосистемы, где основная роль в их образовании принадлежит бурым и диатомовым водорослям, планктону, цианобактериям и пр.; в пресноводных водоемах активными продуцентами выступают диатомовые, зеленые и сине-зеленые водоросли [Gribble, 2010]. Кроме того, образованию ХФС способствуют про-

цессы дехлорирования высокохлорированных фенолов, протекающие в компонентах окружающей среды под действием анаэробных и аэробных микроорганизмов. При этом продуктами восстановительного дехлорирования являются хлорированные фенолы, а окислительного дехлорирования – метокси- и гидроксихлорфенолы [Field, Sierra-Alvarez, 2007]. Наряду с естественным продуцированием в природных экосистемах протекают и биохимические процессы преобразования ХФС, при этом состав промежуточных и конечных продуктов определяется условиями среды: в анаэробных условиях образуются менее токсичные хлорированные производные, а в аэробных – более токсичные [Field, Sierra-Alvarez, 2007; Field, 2016].

Хлороформ – летучее галогенпроизводное, обладает малой растворимостью в воде и низкой липофильностью, может оказывать негативное воздействие на биоту и человека [Watts et al., 2004]. Хлороформ плохо удерживается, поэтому не накапливается в почве, донных осадках и водной толще, что приводит к значительной эмиссии его в атмосферу. При этом некоторая часть присутствующего в атмосфере хлороформа тем не менее может вымываться дождевыми осадками, поступая на поверхность почвы, а также в водную среду [Watts et al.,

2004]. Считается, что в основном хлороформ поступает в окружающую среду от источников природного происхождения, среди которых наиболее значимым являются почвенные процессы [Watts et al., 2004]. Образование хлороформа в почвах происходит преимущественно в верхних слоях, богатых органическим веществом, в результате ферментативного продуцирования (катализируемого хлорпероксидазой) почвенными организмами, при биогенном хлорировании почвенных кислот (в основном гуминовых веществ), а также при биодеградации и декарбоксилировании трихлоруксусной кислоты, образующейся в поверхностном слое почвы биогенным хлорированием органического вещества. Кроме того, хлороформ может продуцироваться различными насекомыми, растительностью (наземной и пресноводной); также свой вклад в эмиссию хлороформа вносят источники абиотического происхождения [Watts et al., 2004].

Ранее сотрудниками ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск) были обследованы водные экосистемы Европейского Севера России с разной степенью развития анаэробных условий, а именно: бореальные озера на юго-западе Архангельской области, малые озера на территориях Большеземельской и Малоземельской тундр, о. Вайгач, а также водоемы субарктического гидротермального урочища Пымвашор [Колпакова, 2018; Колпакова, Вельямидова, 2020; Kokryatskaya et al., 2023]. По результатам проведенных исследований установлены количественное содержание и состав ХОС в воде и донных осадках, показаны специфика распределения, пути их поступления в водоемы, а также особенности продуцирования, трансформации и деструкции, что позволило оценить влияние процессов образования этих соединений на экологическое состояние исследованных водных экосистем в специфических условиях северных территорий.

В данной работе представлены результаты изучения поведения ХОС в водоемах, находящихся на разной стадии естественного отделения от Белого моря.

Материалы и методы

Карельский и Кандалакшский берега Белого моря сильно изрезаны и имеют множество заливов и лагун. В результате изостатического постгляциального поднятия берега небольшие заливы и лагуны отделяются от моря [Краснова и др., 2013]. Специфичной чертой таких водоемов морского происхождения является присутствие в придонных водах сероводорода,

генерируемого в ходе сульфатредукции, который является не только токсическим агентом, но и сильнейшим восстановителем. Он играет роль основного регулятора окислительно-восстановительных условий и влияет на общую направленность и эффективность протекающих в водоеме процессов, в том числе на интенсивность процессов продуцирования, трансформации и деградации ХОС.

В Республике Карелия, в Кандалакшском заливе Белого моря, насчитывается несколько водоемов, утративших связь с морем. Комплексные исследования таких водоемов уже более 10 лет проводятся сотрудниками Беломорской биологической станции имени Н. А. Перцова Биологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (ББС МГУ) [Краснова, 2017].

Объектами настоящего исследования являются водоемы (малые прибрежные озера с различной степенью стратификации вод и развития анаэробных условий), расположенные недалеко от ББС МГУ: Нижнее Ершовское, Трехцветное и Большие Хрусломены (рис. 1).

Озеро Нижнее Ершовское – одно из двух озер, образовавшихся на месте древнего пролива, соединенное протокой с Верхним Ершовским озером, из которого получает пресную воду. Нижнее Ершовское озеро отделено от Белого моря каменистым барьером, по которому из него вытекает пресный ручей. Поступление небольшого количества воды из моря происходит не чаще, чем раз в год, только во время сильных сизигийных приливов и штормов. Большая часть водной толщи пресная или солоноватая (0,1–0,7 епс). Максимальная глубина озера составляет 2,5 м. Температура в нем меняется по всей водной толще в зависимости от климатического сезона; поскольку глубина озера невелика, летом оно прогревается до дна (до 19 °С). В настоящее время в озерных водах сероводород практически полностью отсутствует [Лосюк и др., 2021].

Озеро Трехцветное считается полностью отделившимся от моря водоемом со стабильной стратифицированной структурой и всеми признаками меромиксии, с максимальной глубиной 7,5 м [Лосюк и др., 2021, 2023]. Озеро получило свое название за разные цвета трех его слоев: верхний слой воды желтоватый из-за поступающих гуминовых веществ со стоком из болота, ниже – слой ярко-зеленого цвета, а придонный слой – мутно-желтая сероводородная вода. Верхний слой воды (до 1 м) является пресным, нижерасположенные воды соленые: слой хемоклина (до ~2,5 м) с соленостью до

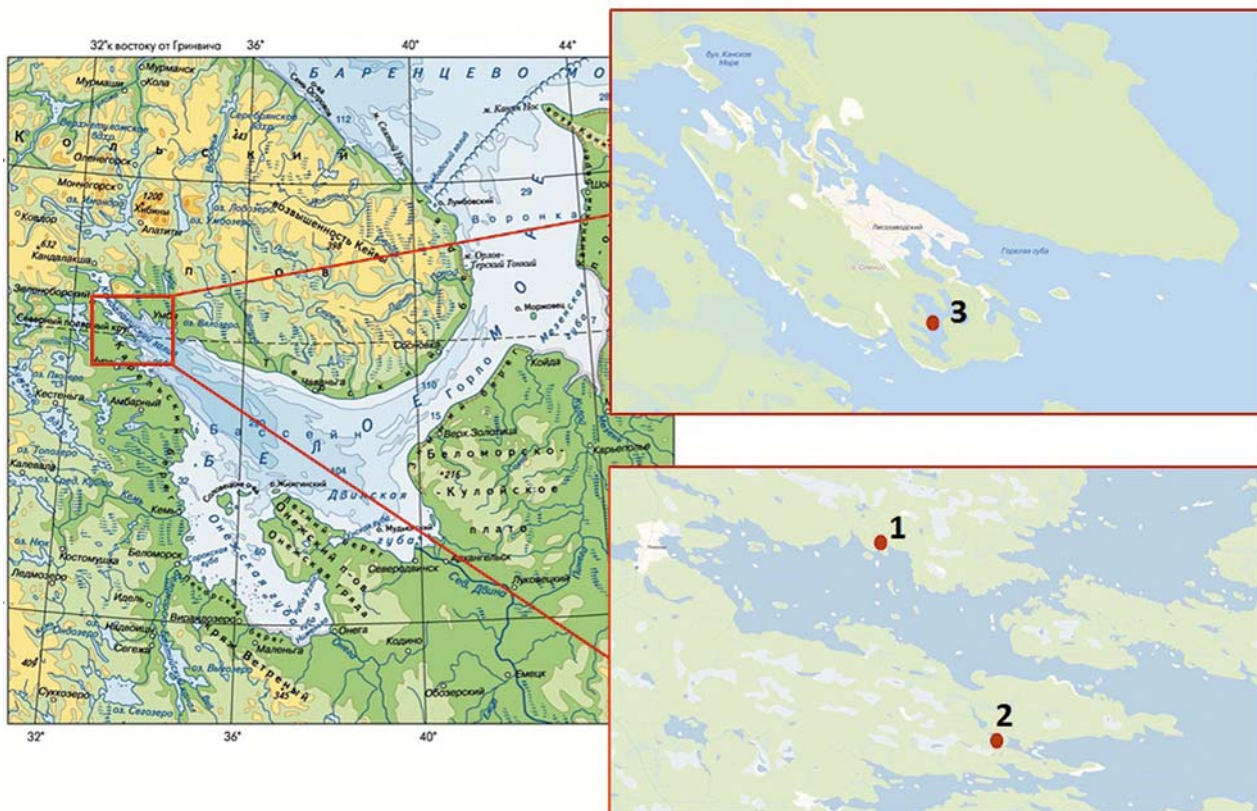


Рис. 1. Карта-схема объектов исследования: 1 – оз. Нижнее Ершовское; 2 – оз. Трехцветное; 3 – оз. Большие Хрусломены

Fig. 1. Schematic map of the study objects: 1 – Lake Nizhneye Ershovskoye; 2 – Lake Trekhtsvetnoye; 3 – Lake Bol'shie Khrusloмены

11,9 епс и появлением сероводорода; слой минималимниона (от 3,0 до 7,0 м) с постоянными температурой (6–7 °С) и соленостью (~22 епс), содержание сероводорода в котором достигает 600 мг/л [Лосюк и др., 2021]. Между этими слоями находится узкий пикноклин с резкими физико-химическими градиентами. Слой зеленой воды мощностью 15–20 см располагается непосредственно над хемоклином. На границе аэробной и анаэробной зон в большом количестве присутствуют аноксигенные фототрофные бактерии (зеленоокрашенные серобактерии), которые и придают ярко-зеленый цвет воде [Лосюк и др., 2021, 2023].

Озеро Большие Хрусломены имеет сложную форму и максимальную глубину около 20 м. Оно отделено от моря фильтрующей дамбой, через которую соленая вода при каждом приливе поступает в водоем. Озеро имеет устойчивую стратифицированную структуру (меромиктическую): солоноватый (4–7 епс) верхний слой толщиной около 2 м (миксолимнион), ниже располагаются гало-, термо- и хемоклин, а в минималимнионе сохраняется реликтовая соленая вода с наибольшей соленостью возле дна

около 24 епс. Сезонные колебания температуры происходят в верхних слоях, в зоне ниже хемоклина (около 3 м) температура остается практически одинаковой (7 °С). Содержание сероводорода в озере обнаруживается с глубины 4 м (ниже хемоклина) и возрастает с глубиной до 600 мг/л [Savichev et al., 2020].

Пробы воды для исследования отбирались в марте 2019 года сотрудниками ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН во время работы комплексной экспедиции на БС МГУ.

Отбор проводился в наиболее глубокой точке акватории озер с разных горизонтов (учитывая пресный и соленый слои, а также слой хемоклина) горизонтальным поликарбонатным батометром (США) объемом 2 л.

Анализ проб воды на содержание индивидуальных ХФС проводился в соответствии с РД 52.24.507-2012. Образцы воды подкисляли до рН 2–3 и экстрагировали гексаном. После разделения фаз и рекстракции раствором K_2CO_3 соединения дериватизировали уксусным ангидридом с получением ацетильных производных. Анализ проб воды на содержание хлороформа проводился согласно

МИ № 88–16365–002–2014. Для количественного определения и идентификации индивидуальных ХОС применялся газовый хроматограф «Кристалл 5000.1» с электрозахватным детектором при использовании кварцевой капиллярной колонки с неполярной неподвижной жидкой фазой ZB-5 (30 м × 0,32 мм).

Результаты и обсуждение

В пробах озерной воды из всего ряда проанализированных ХФС (34 стандартных соединения) были идентифицированы только хлорированные фенолы (табл.). Компонентный состав этих соединений представлен рядом от моно- до тетрахлорзамещенных фенолов (рис. 2). Токсичный пентахлорфенол (из группы стойких органических загрязнителей), имеющий только антропогенное происхождение, не обнаружен.

Суммарное содержание хлорированных фенолов по всем озерам составило от 0,06 до 49,9 мкг/дм³, при этом самые высокие концентрации обнаружены в водах нижних слоев. Следует отметить, что для природных вод нормативы на содержание хлорированных фенолов отсутствуют. Для сравнения можно привести данные исследований поверхностных вод пресных озер и рек Канады – от 0,002 до 2,0 мкг/дм³ [Czaplicka, 2004].

Как видно из данных таблицы, наибольшее содержание хлорфенолов установлено

в воде оз. Трехцветного, водоема с доказанной меромиктической структурой [Лосюк и др., 2021], – от 0,059 до 49,9 мкг/дм³. При этом если в верхнем пресном слое суммарное содержание хлорфенолов невелико (0,06 мкг/дм³), то к нижним слоям (с нарастающим содержанием соли в воде) наблюдалось резкое повышение их концентраций: в зоне хемоклина – на два порядка (5,85 мкг/дм³), в придонном слое – на три порядка (49,9 мкг/дм³).

При изучении компонентного состава хлорфенолов в верхних слоях выявлены только высокохлорированные три- и тетрахлорфенолы (2,3,5-, 2,4,6-трихлорфенолы, 2,3,5,6-тетрахлорфенол). Известно, что источниками образования трихлорфенолов наряду с их продуцированием могут быть и процессы восстановительного дехлорирования 2,3,5,6-тетрахлорфенола в присутствии анаэробных микроорганизмов [Field, Sierra-Alvarez, 2007]. Присутствие тетрахлорфенолов в воде в большей степени связано с их поступлением от абиотических источников образования (например, процессов сжигания/горения древесины и пр.) [Field, 2016].

В придонном слое наряду с 2,3,5- и 2,4,5-трихлорфенолами зафиксировано присутствие в значимых количествах еще и низкохлорированных фенолов (моно-, ди-). Скорее всего, в соленых водах в сильно восстановительных условиях, вызванных экстремально высоким содержанием сероводорода (~ 600 мг/л)

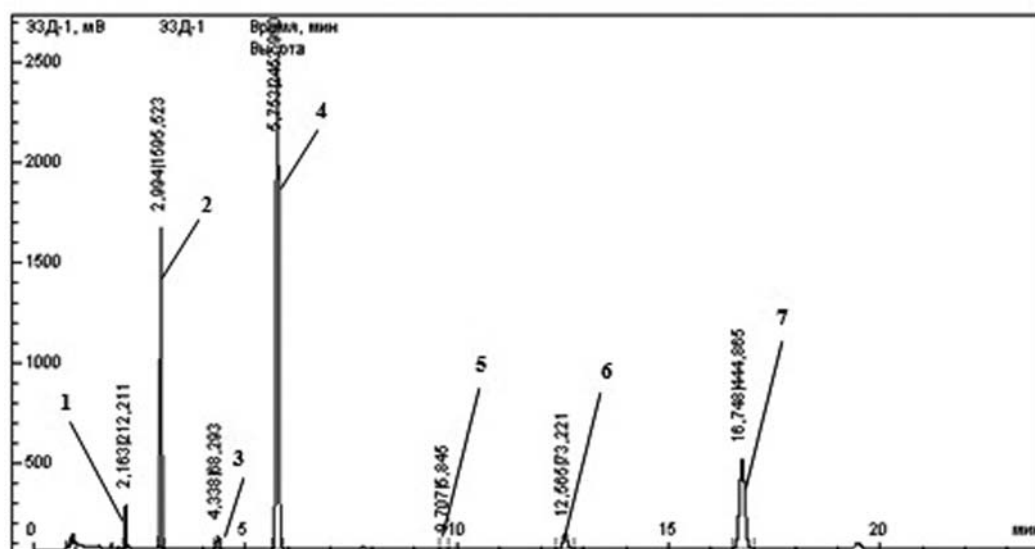


Рис. 2. Типичная хроматограмма экстрактов воды озера Трехцветное (глубина 7,0 м): 1 – 4-хлорфенол; 2 – 2-хлорфенол; 3 – 2,3-дихлорфенол; 4 – 2,4-дихлорфенол; 5 – 2,6-дихлорфенол; 6 – 2,3,5-трихлорфенол; 7 – 2,4,5-трихлорфенол

Fig. 2. Typical chromatogram of water extracts from Lake Trekhtsvetnoye (depth 7.0 m): 1 – 4-chlorophenol; 2 – 2-chlorophenol; 3 – 2,3-dichlorophenol; 4 – 2,4-dichlorophenol; 5 – 2,6-dichlorophenol; 6 – 2,3,5-trichlorophenol; 7 – 2,4,5-trichlorophenol

[Краснова, 2021; Лосюк и др., 2023], активность процессов продуцирования хлорфенолов снижается и, напротив, процессы их восстановительного (анаэробного) дехлорирования более активны. Высокое значение концентрации хлорированных фенолов в придонном слое свидетельствует о накоплении здесь этих соединений.

Концентрации хлорфенолов того же порядка, что и в оз. Трехцветном, найдены в воде оз. Большие Хрусломены – от 0,53 до 33,7 мкг/дм³ (табл.). При этом здесь, по аналогии с Трехцветным, в верхнем пресном слое содержание хлорфенолов невелико (0,53 мкг/дм³), в зоне хемоклина концентрации хлорфенолов выше на порядок (5,13 мкг/дм³), а в придонном слое – уже на два порядка (33,7 мкг/дм³). Компонентный состав хлорфенолов в верхнем слое представлен преимущественно 2-хлорфенолом и 2,3,4-трихлорфенолом, в воде зоны хемоклина преобладали монохлорфенолы (2- и 4-хлорфенолы), а в придонном слое доминировал 2,4,5-трихлорфенол.

Озеро Нижнее Ершовское отличалось невысокими концентрациями хлорированных фено-

лов в воде – от 0,08 до 0,12 мкг/дм³ (табл.). При этом резких отличий как в содержании, так и в составе хлорфенолов в водных слоях с разным уровнем солености не наблюдалось. Наиболее значимыми по количественному содержанию были 2-хлорфенол и 2,4,5-трихлорфенол.

Хлороформ был найден во всех исследованных пробах озерной воды (табл.). Концентрации его составляли от 0,06 до 0,99 мкг/дм³. Общих закономерностей распределения хлороформа по глубине исследованных озер не наблюдалось. В озере Трехцветное отмечено снижение хлороформа по глубине, в озере Большие Хрусломены максимальные концентрации хлороформа найдены в воде на глубине 3 м, в зоне хемоклина. В озере Нижнее Ершовское установлено увеличение концентраций хлороформа в воде по глубине, что может быть обусловлено его поступлением с грунтовыми водами из почв водосборных территорий. Кроме того, более высокое содержание хлороформа в воде нижележащих слоев может быть связано с образованием этого соединения водными продуцентами, а также с медленным его продвижением в водной толще к поверхности и активным

Содержание ХОС (мкг/дм³) в озерной воде на разных глубинах

Content of organochlorine compounds (µg/dm³) in lake water at different depths

Соединение Compound	оз. Трехцветное Lake Trekhtsvetnoye			оз. Большие Хрусломены Lake Bol'shie Khruslomeny			оз. Нижнее Ершовское Lake Nizhneye Ershovskoye	
	1,5 м	3,0 м	7,0 м	1,0 м	3,0 м	17,0 м	1,0 м	2,0 м
2-хлорфенол 2-chlorophenol	н.о. n.d.	3,06	5,72	0,22	2,66	3,72	0,05	0,03
4-хлорфенол 4-chlorophenol	н.о. n.d.	н.о. n.d.	1,41	н.о. n.d.	1,75	4,77	н.о. n.d.	0,02
2,3-дихлорфенол 2,3-dichlorophenol	н.о. n.d.	н.о. n.d.	0,40	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,4-дихлорфенол 2,4-dichlorophenol	н.о. n.d.	0,79	18,1	н.о. n.d.	0,50	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,6-дихлорфенол 2,6-dichlorophenol	н.о. n.d.	1,99	0,13	н.о. n.d.	0,19	1,49	0,02	0,03
2,3,4-трихлорфенол 2,3,4-trichlorophenol	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	0,27	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,3,5-трихлорфенол 2,3,5-trichlorophenol	0,04	н.о. n.d.	0,13	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,4,5-трихлорфенол 2,4,5-trichlorophenol	н.о. n.d.	н.о. n.d.	24,0	н.о. n.d.	0,03	23,6	0,05	н.о. n.d.
2,4,6-трихлорфенол 2,4,6-trichlorophenol	0,01	0,01	н.о. n.d.	0,02	н.о. n.d.	0,15	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,3,4,6-тетрахлорфенол 2,3,4,6-tetrachlorophenol	н.о. n.d.	< 0,03	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	< 0,03	< 0,03
2,3,5,6-тетрахлорфенол 2,3,5,6-tetrachlorophenol	< 0,03	н.о. n.d.	н.о. n.d.	< 0,03	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
Сумма хлорфенолов Total chlorophenol content	0,06	5,85	49,9	0,53	5,13	33,7	0,12	0,08
Хлороформ Chloroform	0,44	0,41	0,29	0,11	0,31	0,12	0,06	0,99

Примечание. н.о. – не обнаружено; 0,03 – предел обнаружения тетрахлорфенолов.

Note. n.d. – not detected; 0.03 – detection limit of tetrachlorophenols.

испарением из верхних горизонтов. В целом выявленные концентрации хлороформа соответствовали данным, полученным для ранее обследованных озер Архангельской области, – от 0,05 до 5,3 мкг/дм³ [Колпакова, Вельямидова, 2019], а также для озер Онтарио и Верхнее (система Великих озер, Северная Америка) – до 4,2 мкг/л [Watts et al., 2004].

Заключение

При исследовании стратифицированных озер, расположенных в Кандалакшском заливе Белого моря и не подверженных прямому антропогенному воздействию, выявлено наличие в озерной воде хлорорганических соединений. Уровни содержания и компонентный состав этих соединений в озерной воде обусловлены преимущественно природными источниками их образования. Показано, что в соленых водах в сильно восстановительных условиях активность естественных процессов хлорирования органического вещества снижается, а продуктивность процессов восстановительного дехлорирования хлорфенольных соединений с участием анаэробных микроорганизмов возрастает, что приводит к накоплению этих соединений в анаэробных водах монимолимиона.

Литература

Колпакова Е. С. Хлорфенольные соединения в пресноводных озерах субарктических регионов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 4. С. 380–390. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-380-390

Колпакова Е. С., Вельямидова А. В. Мониторинг содержания хлороформа в воде пресноводных водоемов // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Мат-лы II Всерос. науч.-практ. конф., приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ (Иркутск, 5–7 июня 2019 г.). Иркутск, 2019. С. 185–190.

Колпакова Е. С., Вельямидова А. В. Хлорорганические соединения в субарктических малых озерах // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66, № 2. С. 180–197. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197

Краснова Е. Д. Водоемы, отделяющиеся от Белого моря: разнообразие и типовая структура // Изучение, рациональное использование и охрана природных ресурсов Белого моря: Мат-лы XIII Всерос. конф. с междунар. участием: приурочено к 60-летию Беломорской биостанции Зоологического института РАН «Мыс Картеш» (Санкт-Петербург, 17–20 октября 2017 г.). СПб., 2017. С. 115–118.

Краснова Е. Д., Пантюлин А. Н., Белевич Т. А., Воронов Д. А., Демиденко Н. А., Житина Л. С., Ильяш Л. В., Кокрятская Н. М., Лунина О. Н., Мардашова М. В., Прудковский А. А., Саввичев А. С., Филиппов А. С., Шевченко В. П. Комплексные исследования отделяющихся водоемов на разных стадиях изоляции от

Белого моря в марте 2012 г. // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 714–717. doi: 10.7868/s0030157413050067

Краснова Е. Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 3. С. 322–333. doi: 10.31857/S0321059621030093

Лосюк Г. Н., Кокрятская Н. М., Краснова Е. Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61, № 3. С. 401–412. doi: 10.31857/S003015742102012X

Лосюк Г. Н., Кокрятская Н. М., Вахрамеева Е. А., Алиев Р. А. Соединения восстановленной серы в донных осадках водоемов на разных стадиях отделения от Кандалакшского залива Белого моря (меромиктическое озеро Трехцветное) // Океанология. 2023. № 5. С. 784–795. doi: 10.31857/S0030157423050076

Czaplicka M. Sources and transformations of chlorophenols in the natural environment // Sci. Total Environ. 2004. Vol. 322. P. 21–39.

Field J. A., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds // Science dossier. Euro Chlor. 2007. P. 15–33.

Field J. A. Natural production of organohalide compounds in the environment // Organohalide-respiring bacteria. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. P. 7–29. doi: 10.1007/978-3-662-49875-0_2

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive update. Wien, New York: Springer, 2010. 613 p.

Kokryatskaya N. M., Kolpakova E. S., Titova K. V., Velyamidova A. V. Sulfur and chlorine compounds in water bodies of the Pymvashor subarctic hydrothermal system // Environ. Sci. Pollut. Res. 2023. Vol. 30. P. 27328–27339. doi: 10.1007/s11356-022-24141-y

Savichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Beletsky A. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kallistova A. Yu., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A., Sigalevich P. A., Mardanov A. V., Ravin N. V., Pimenov N. V. Microbial processes and microbial communities in the water column of the polar meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea Coast // Frontiers in microbiology. 2020. No. 11. doi: 10.3389/fmicb.2020.01945

Watts P., Long G., Meek M. E. Chloroform. Concise International Chemical Assessment Document No. 58. Geneva: World Health Organization, 2004. 58 p.

References

Czaplicka M. Sources and transformations of chlorophenols in the natural environment. *Sci. Total Environ.* 2004;322:21–39.

Field J. A. Natural production of organohalide compounds in the environment // *Organohalide-respiring bacteria*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2016. P. 7–29. doi: 10.1007/978-3-662-49875-0_2

Field J. A., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. *Science dossier. Euro Chlor.* 2007. P. 15–33.

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive update. Wien, New York: Springer; 2010. 613 p.

Kolpakova E. S. Chlorophenol compounds in freshwater lakes of subarctic regions. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2018;64(4):380–390. (In Russ.). doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-380-390

Kolpakova E. S., Velyamidova A. V. Monitoring chloroform content in the water of freshwater reservoirs. *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii: Mat-ly II Vseros. nauch.-prakt. konf., priurochennoi k 55-letiyu kafedry gidrologii i prirodopol'zovaniya IGU (Irkutsk, 5–7 iyunya 2019 g.) = Current trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: Proceed. II All-Russ. scientific-pract. conf. dedicated to the 55th anniversary of the Department of Hydrology and Environmental Management of ISU (Irkutsk, June 5–7, 2019)*. Irkutsk, 2019. P. 185–190. (In Russ.).

Kolpakova E. S., Velyamidova A. V. Organochlorine compounds in subarctic small lakes. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(2):180–197. (In Russ.). doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197

Kokryatskaya N. M., Kolpakova E. S., Titova K. V., Velyamidova A. V. Sulfur and chlorine compounds in water bodies of the Pymvashor subarctic hydrothermal system. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023;30:27328–27339. doi: 10.1007/s11356-022-24141-y

Krasnova E. D. Reservoirs separating from the White Sea: diversity and typical structure. *Izuchenie, ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov Belogo morya: Mat-ly XIII Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiyem, priurocheno k 60-letiyu Belomorskoj biostantsii Zoologicheskogo instituta RAN «Mys Kartesh» (Sankt-Peterburg, 17–20 oktyabrya 2017 g.) = Study, rational use and protection of natural resources of the White Sea: Proceed. XIII All-Russ. conf. with int. part. dedicated to the 60th anniversary of the White Sea*

Biological Station of the Zoological Institute of the RAS 'Cape Kartesh' (St. Petersburg, Oct. 17–20, 2017). St. Petersburg; 2017. P. 115–118. (In Russ.).

Krasnova E. D., Pantyulin A. N., Belevich T. A., Voronov D. A., Demidenko N. A., Zhitina L. S., Il'yash L. V., Kokryatskaya N. M., Lunina O. N., Mardashova M. V., Prudkovskii A. A., Savichev A. S., Filippov A. S., Shevchenko V. P. Multidisciplinary studies of the separating lakes at different stages of isolation from the White Sea performed in March 2012. *Oceanology*. 2013;53(5): 639–642. doi: 10.1134/S0001437013050068

Krasnova E. D. Ecology of meromictic lakes of Russia. 1. Coastal marine waterbodies. *Water Resources*. 2021;48(3):427–438. doi: 10.1134/S009780782103009X

Losyuk G. N., Kokryatskaya N. M., Krasnova E. D. Hydrogen sulfide contamination of coastal lakes at different stages of isolation from the White Sea. *Oceanology*. 2021;61(3):351–361. doi: 10.1134/S0001437021020120

Losyuk G. N., Kokryatskaya N. M., Vakhrameeva E. A., Aliev R. A. Reduced sulfur compounds in bottom sediments of lakes at different stages of separation from Kandalaksha Bay of the White Sea (meromictic Lake Trekhtsvetnoye). *Okeanologiya = Oceanology*. 2023;5:784–795. (In Russ.). doi: 10.31857/S0030157423050076

Savichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Beletsky A. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kallistova A. Yu., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A., Sigalovich P. A., Mardanov A. V., Ravin N. V., Pimenov N. V. Microbial processes and microbial communities in the water column of the polar meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea Coast. *Frontiers in microbiology*. 2020;11. doi: 10.3389/fmicb.2020.01945

Watts P., Long G., Meek M. E. Chloroform. Concise International Chemical Assessment Document No. 58. Geneva: World Health Organization; 2004. 58 p.

Поступила в редакцию / received: 04.05.2024; принята к публикации / accepted: 09.07.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Колпакова Елена Сергеевна

научный сотрудник

e-mail: kolpelen@yandex.ru

Вельямидова Анна Владиславовна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник

e-mail: allavel@yandex.ru

Королева Татьяна Алексеевна

канд. техн. наук, научный сотрудник

e-mail: tataak@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Kolpakova, Elena

Researcher

Velyamidova, Anna

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

Koroleva, Tatiana

Cand. Sci. (Eng.), Researcher

УДК 556.555.3 (282.247.211)

СОВРЕМЕННАЯ БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО ОТ КРУПНЕЙШИХ ЕГО ПРИТОКОВ

Н. Е. Галахина*, М. Б. Зобков

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

Определена современная биогенная нагрузка на второе по величине пресноводное озеро Европы – Онежское – от крупнейших его притоков (рек Водла, Шуя и Суна). Речной сток играет важную роль в формировании химического состава воды Онежского озера. Исследование основано на данных по содержанию биогенных элементов ($P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$, $N\text{-NH}_4$, $N\text{-NO}_2$, $N\text{-NO}_3$, $N_{\text{орг}}$, $N_{\text{общ}}$), полученных в разные сезоны 2001–2002, 2007–2008, 2015–2016 и 2021 гг. Азотная речная нагрузка формируется преимущественно за счет органических его форм (в среднем 78 % от $N_{\text{общ}}$). Повышенное поступление $P_{\text{мин}}$ отмечено с водами р. Шуи в 2021 г. (40 % от $P_{\text{общ}}$) и р. Суны (нижнее русло) в 2001–2002 и 2007–2008 гг. (72 и 61 % от $P_{\text{общ}}$ соответственно), что связано с изменением антропогенного воздействия. С водами р. Шуи в 2007–2008 гг., по сравнению с другими рассматриваемыми периодами, увеличился сток в озеро $P_{\text{мин}}$. Отмечено снижение стока минерального фосфора и аммонийного азота с водами нижнего русла р. Суны и увеличение фосфорной и нитратной нагрузки от Кондопожского канала.

Ключевые слова: река Шуя; река Водла; река Суна; антропогенное влияние

Для цитирования: Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Современная биогенная нагрузка на Онежское озеро от крупнейших его притоков // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 53–61. doi: 10.17076/lim1925

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ (№ 22-17-00193). Химические анализы воды проведены за счет средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

N. E. Galakhina*, M. B. Zobkov. CURRENT NUTRIENT LOAD ON LAKE ONEGO FROM ITS LARGEST TRIBUTARIES

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

The current nutrient load on the second largest freshwater lake in Europe, Lake Onego, from its largest tributaries was determined (Vodla, Shuya and Suna rivers). Discharge from rivers plays an important role in the formation of the water chemical composition

of Lake Onego. The study is based on the nutrient content data (IP, TP, N-NH₄, N-NO₂, N-NO₃, TON, TN) collected in different seasons of 2001–2002, 2007–2008, 2015–2016 and 2021. River nitrogen load is mainly formed of organic forms (78 % of TN on average). Increased IP inflow arrived with the waters from the Shuya River in 2021 (40 % of TP inflow) and the lower reaches of the Suna River in 2001–2002 and 2007–2008 (72 and 61 % of TP inflow, respectively), as a result of changes in human impact. Inorganic phosphorus load from the Shuya River was elevated in 2007–2008 compared with other periods. Although the nutrient inflow from the Suna River has not generally changed over the study period, a decrease in IP and ammonium nitrogen inflow from its lower reaches and an increase in the phosphorus and nitrate load from the Kondopoga Canal were detected.

Keywords: Shuya River; Vodla River; Suna River; anthropogenic impact

For citation: Galakhina N. E., Zobkov M. B. Current nutrient load on Lake Onego from its largest tributaries. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 53–61. doi: 10.17076/lim1925

Funding. The study was supported by a Russian Science Foundation grant (# 22-17-00193). Water chemical analyses were financed from the federal budget through state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

Введение

Речной биогенный сток является одним из основных факторов, определяющих биопродукционный потенциал водоема и влияющих на его трофический статус. В формировании химического состава воды Онежского озера, одного из крупнейших озер Европы, главная роль принадлежит речному стоку: в него впадает 1152 реки со среднемноголетним водным стоком 17,3 км³/год, или 72 % от общего стока в озеро [Крупнейшие..., 2015]. Притоки являются важным источником поступления в Онежское озеро биогенных элементов (72 % от общего стока P_{общ} и 68 % от общего стока N_{общ}) [Лозовик и др., 2016], а также Fe, Mn, Cu и Zn (83–97 % от общего стока по каждому компоненту отдельно) [Лозовик и др., 2020].

Сходство основных химических показателей притоков Онежского озера определяется близкими климатическими условиями, которые формируют их сток. Однако неоднородность геологического и геоморфологического строения бассейна озера, особенности его гидрографии обуславливают специфику гидрохимического и гидрологического режимов притоков. Бассейн Онежского озера расположен на двух крупных геологических формированиях: северная часть сложена кристаллическими породами Балтийского щита, южная часть находится на Русской платформе [Бискэ, 1959]. Наибольшее количество рек расположены в северо-западной части бассейна Онежского озера, а сток большинства крупных рек зарегулирован озерами [Гидрохимия..., 1973]. Для них характерно низкое содержание растворенных минеральных веществ

и высокая концентрация органического вещества и железа. Густота речной сети в юго-западной и южной частях бассейна существенно меньше, природная концентрация большинства химических компонентов в их водах в 2–3 раза выше по сравнению с реками северной части бассейна озера. К крупнейшим притокам Онежского озера относятся реки Шуя, Суна и Водла (рис. 1), на их бассейны приходится более половины водосборной территории водоема и около 60 % речного стока в озеро [Крупнейшие..., 2015]. Реки Шуя и Суна являются притоками северо-западного побережья, р. Водла – северо-восточного, при этом все три притока находятся на Балтийском щите, благодаря чему имеют сходный химический состав воды. Некоторые отличия в содержании органического вещества в р. Суне по сравнению с реками Шуя и Водла связаны с зарегулированностью ее стока [Сабылина, 2007].

Ежемесячные и сезонные гидрохимические исследования притоков Онежского озера начались в 1963–1965 годах [Гидрохимия..., 1973], затем они периодически проводились в 1986–1987 [Пирожкова, 1990], 2001–2002 [Сабылина, 2007] и 2007–2008 [Лозовик и др., 2016] годах. Анализ данных, полученных в эти временные периоды, свидетельствует о том, что вынос биогенных элементов с реками в озеро зависит от хозяйственной деятельности на водосборах. В середине 1960-х годов основным поставщиком биогенных элементов в Онежское озеро среди трех главных притоков была р. Водла [Гидрохимия..., 1973]. В конце 1970-х и начале 1980-х доминирующая роль в биогенной нагрузке стала принадлежать р. Шуе

в связи с активизацией сельскохозяйственной деятельности на ее водосборе. В этот период ее бассейн претерпел значительные ландшафтные изменения (сведение лесов, распашка и мелиорация), что дополнительно обогатило ее воды биогенными элементами [Пирожкова, 1990]. Согласно данным [Сабылина и др., 2010], в 2001–2002 и 2007–2008 гг. произошло снижение речной биогенной нагрузки в Онежское озеро по сравнению с более ранними периодами за счет уменьшения антропогенного воздействия на водосборах рек. Следует отметить, что речная биогенная нагрузка в эти периоды была рассчитана с использованием среднемноголетних расходов рек. Наличие ежемесячных данных расходов рек (данные Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

России) за изучаемые временные периоды позволило рассчитать фактический речной сток, использованный в настоящем исследовании.

На качество воды в Петрозаводской и Кондопожской губах Онежского озера существенное влияние оказывают реки Шуя и Суна [Galakhina et al., 2022], тогда как р. Водла впадает в открытую часть озера, вследствие чего может влиять на химический состав ее воды. В многолетнем плане наблюдается увеличение концентрации $P_{\text{общ}}$ в Кондопожской губе [Galakhina et al., 2022], что может быть связано с возрастанием биогенной нагрузки на водосборах притоков озера. С начала 2000-х годов в Республике Карелия активно развивается садковое форелеводство [Китаев и др., 2006], в том числе в бассейне Онежского озера, где расположена половина форелевых хозяйств региона

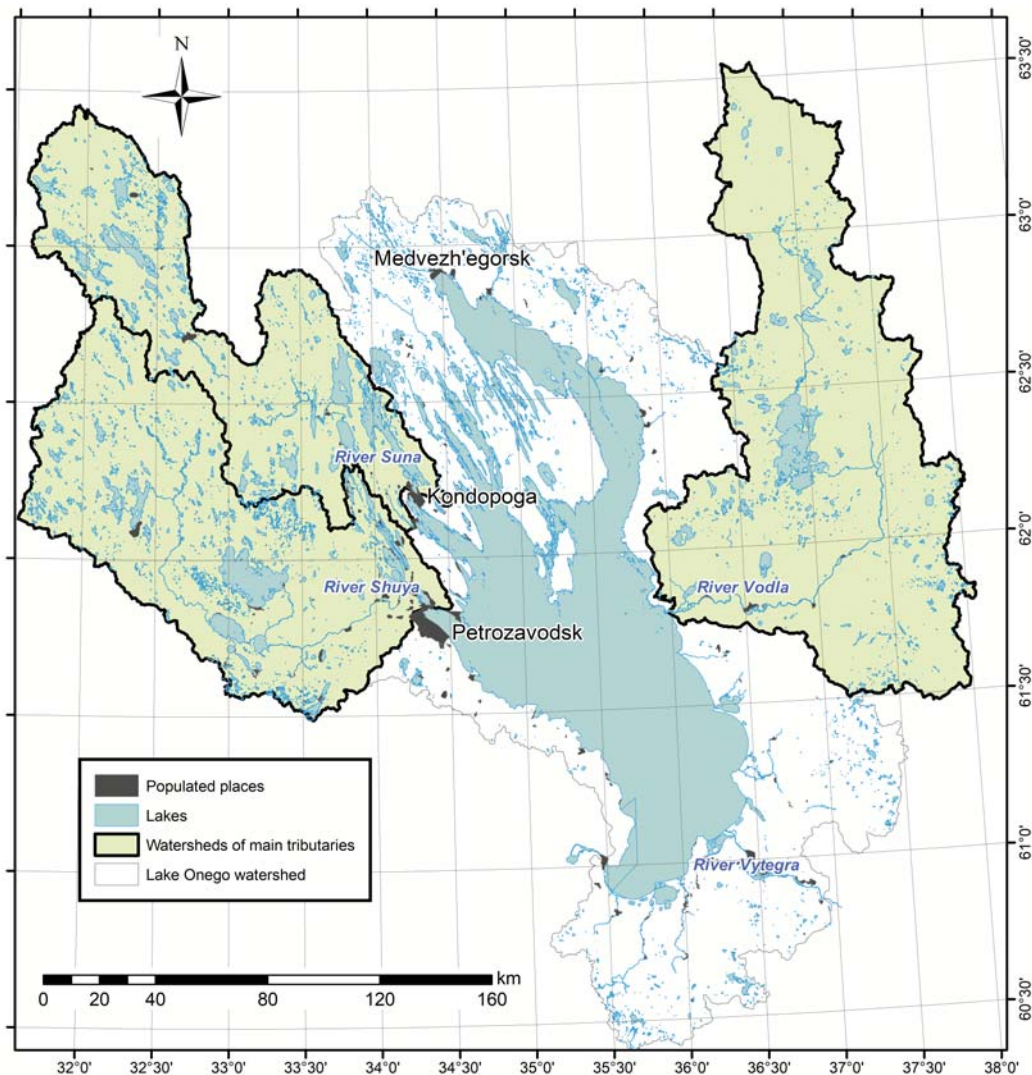


Рис. 1. Карта-схема водосборов основных притоков Онежского озера

Fig. 1. Schematic map of the catchment areas of the main Lake Onego tributaries

[Крупнейшие..., 2015]. По данным Ассоциации форелеводов Карелии [Карта..., 2023], на водосборную территорию р. Суны приходится около 50 % общего объема форели, выращиваемой на водосборе Онежского озера, тогда как на водосборе р. Шуи выращивается около 20 % от общего объема. Кроме того, очистные сооружения некоторых населенных пунктов, расположенных на водосборе основных притоков Онежского озера, работают неэффективно [Лозовик и др., 2016]. Все вышеперечисленное может отражаться на речной биогенной нагрузке на Онежское озеро.

Цель исследования – выявить изменения в речной биогенной нагрузке на Онежское озеро на основе сезонных данных по содержанию биогенных элементов (БЭ) в воде трех его основных притоков (рек Водла, Шуя и Суна) в современный период.

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

Материалы и методы

Объекты исследования

Водосборные территории исследованных рек отличаются размерами и озерностью (табл. 1). Река Водла имеет наибольшую водосборную территорию с низкой озерностью, тогда как площадь водосбора р. Суны наименьшая, а степень озерности высокая. Заболоченность водосборов этих двух рек близкая (табл. 1). Сток р. Суны был искусственно изменен в середине прошлого века. После строительства Гирвасской плотины и Суна-Пальеозерского канала основной сток реки направлен через озера Палье, Сандал и Нигозеро в Кондопожский канал, обеспечивающий Кондопожскую ГЭС. Русло р. Сандалки, связывавшей ранее р. Суны с оз. Сандал, было перекрыто

плотиной, озера Палье, Сандал и Сундозеро превращены в водохранилища [Гидрохимия..., 1973]. В связи с этим нижнее течение реки оказалось фактически изолированным от верхнего и стало представлять собой отдельную реку – нижнее русло р. Суны.

Бассейн р. Шуи является наиболее освоенным в экономическом плане, здесь сосредоточено более 10 % сельскохозяйственного производства Карелии [Атлас..., 2021]: два крупнейших животноводческих предприятия и примерно десяток форелеводческих хозяйств с объемом производства около 1,4 тыс. т рыбы в год. Кроме того, в р. Шуя поступают бытовые сточные воды населенных пунктов, и часть этих стоков не очищается. Освоенность водосборов рек Водла и Суна – слабая, на их берегах расположено несколько поселков, на водосборе р. Суны находятся форелевые хозяйства. В нижнем русле Суны с 2006 г. работала птицефабрика, с 2012 г. на ней происходило постепенное снижение объемов производства, и в настоящее время она закрыта. Река Водла берет свое начало из оз. Водлозеро, находящегося на территории Водлозерского национального парка.

Согласно имеющимся данным [Всероссийская..., 2002; Росстат, 2023], в период с 2002 по 2016 г. численность населения муниципальных районов, находящихся на водосборах исследованных рек, снизилась (рис. 2). Наибольшее сокращение (около 30 %) отмечено для водосбора р. Водлы, для рек Шуя и Суна изменения были менее значимыми.

Отбор проб воды и их химический анализ

Гидрохимические исследования в устьях рек Шуя, Водла и Суна (оба русла) выполнены в 2001 (весна, лето, осень) и 2002 (зима), в 2007 (весна, лето, осень) и 2008 (зима), в 2015 (лето, осень) и 2016 (зима, весна) годах, а в устье р. Шуи также в 2021 г. (все сезоны). Химический анализ проб воды включал определение

Таблица 1. Гидрологические характеристики крупнейших притоков Онежского озера [Сабылина, 2007; Крупнейшие..., 2015]

Table 1. Hydrological characteristics of the largest tributaries of Lake Onego [Sabylina, 2007; Filatov, 2015]

Река River	Длина, км Length, km	Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²	Озерность, % Lake percentage, %	Заболоченность, % Swamp percentage, %
Водла Vodla	149	13 700	5,3	24
Шуя Shuya	194	10 100	10,6	~20
Суна Suna	280	6787	12,9	19

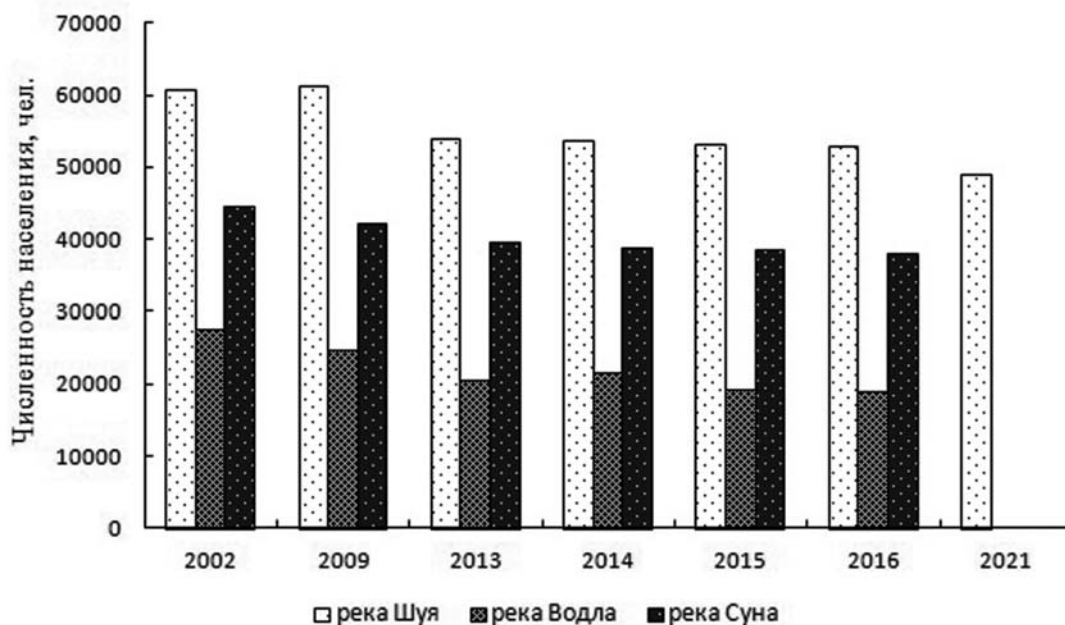


Рис. 2. Динамика численности населения на водосборных территориях крупнейших притоков Онежского озера [данные: Всероссийская..., 2002; Росстат..., 2023]

Fig. 2. Population dynamic in the catchment areas of the main Lake Onego tributaries [after: All-Russian population..., 2002; Rosstat..., 2023]

в них содержания биогенных элементов ($P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , $N_{\text{общ}}$) и выполнялся в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. Формы азота и фосфора определяли спектрофотометрическим методом по стандартным методикам [Аналитические..., 2017]. Концентрацию $N_{\text{орг}}$ рассчитывали по разности между $N_{\text{общ}}$ и суммой неорганических его форм. Качество выполнения химических анализов подтверждено хорошей сходимостью данных в рамках международного лабораторного сличения ICP Waters [Escudero-Oñate, 2016].

Расчет биогенной нагрузки и статистический анализ данных

Расчет речной биогенной нагрузки (L_i) выполнен по средневзвешенному содержанию каждого компонента (C_i) и данным водного стока рек (Q_i , км³/год): $L_i = C_i Q_i$. Средневзвешенная концентрация рассчитывалась с использованием сезонной концентрации биогенных веществ и доли речного стока в каждый сезон. Данные о расходе рек получены от Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (<https://gmvo.skniivh.ru/>). Различия в химическом составе воды каждой реки и биогенной нагрузке от каждой из них в разные периоды исследования оценивали с помощью U-критерия Манна – Уитни при помощи программного обеспечения SofaStatistics

(www.sofastatistics.com). Различия в общей биогенной нагрузке в разные периоды для каждой из исследованных рек проверены с помощью теста ANOVA. Во всех статистических тестах использовался уровень статистической значимости 0,05.

Результаты и обсуждение

Содержание биогенных элементов в воде основных притоков Онежского озера

Средневзвешенная концентрация большинства БЭ в воде исследованных притоков Онежского озера изменялась в широких пределах: $P_{\text{мин}}$ – 1–105 мкг/л, $P_{\text{общ}}$ – 11–146 мкг/л, NH_4^+ – 0,03–0,39 мг N/л, NO_2^- – 0,001–0,022 мг N/л, $N_{\text{общ}}$ – 0,52–1,19 мг/л (табл. 2). Минимальное содержание $P_{\text{общ}}$ наблюдалось в Кондопожском канале на протяжении всего периода исследований, тогда как максимальная его концентрация регистрировалась в нижнем течении р. Суны в 2001–2002 гг., после чего она постепенно снижалась (табл. 2). Повышенное содержание $P_{\text{общ}}$ отмечено в р. Водле в 2007–2008 гг. и в р. Шуе в 2021 г. В остальные периоды его концентрация в исследованных реках была близкой.

Содержание $P_{\text{мин}}$ в большинстве случаев не превышало 28 % от $P_{\text{общ}}$, за исключением р. Суны (нижнее русло) в 2001–2002 и 2007–2008 гг. и р. Шуи в 2021 г. (72, 57 и 41 % от $P_{\text{общ}}$

соответственно). Двукратное увеличение содержания $P_{\text{мин}}$ в воде р. Шуи в 2021 г. может быть связано с выходом из строя очистных сооружений п. Шуя, а также увеличением фосфорной нагрузки в связи функционированием в ее бассейне сельскохозяйственных предприятий, в том числе форелевых ферм. Высокая концентрация БЭ, в том числе $P_{\text{мин}}$, в 2001–2002 и 2007–2008 гг. в нижнем русле р. Суны связана с влиянием сточных вод птицеводческой фермы, объемы производства которой постепенно снижались с 2012 г., что впоследствии выразилось в уменьшении содержания БЭ в ее воде.

Среди форм азота в воде исследованных рек преобладали органические соединения (71–91 % от $N_{\text{общ}}$), что является характерной особенностью поверхностных вод Карелии [Лозовик, 2006]. В нижнем русле р. Суны в 2001–2002 гг. наблюдалось высокое, сопоставимое с $N_{\text{орг}}$, содержание минеральных форм азота (табл. 2), связанное с деятельностью птицефабрики. Близкое содержание нитратного и аммонийного азота также является природной особенностью рек Карелии [Лозовик, 2006], однако в ряде случаев в исследованных реках наблюдалось преобладание аммонийного азота над нитратами (табл. 2), что свидетельствует об антропогенном воздействии на них. Нитраты преобладали в Кондопожском канале в 2007–2008 и 2015–2016 гг., что, возможно, связано с протеканием реки через крупные глубоководные озера Сандал (средняя и максимальная глубины 9,7 и 58,0 м соответственно)

и Пальеозеро (18,0 и 74,0 м соответственно) [Озера..., 2013]. Высокое содержание нитратов является особенностью крупных глубоководных озер (Онежское озеро – 0,18 мг N/л [Galakhina et al., 2022], Байкал – 0,16 мг N/л [Khodzher et al., 2017], Верхнее и Мичиган – 0,32 и 0,17 мг N/л соответственно [Hobbs et al., 2016]). В глубоких стратифицированных озерах слой гипolimниона значительно превышает объем эпилимниона, аммонификация и нитрификация происходят преимущественно в гипolimнионе, а поступление образовавшихся нитратов в эпилимнион ограничено температурной стратификацией воды [Лозовик, 2006]. Содержание аммонийного и нитратного азота в исследованных притоках Онежского озера соответствует их средним концентрациям в речных водах Карелии (0,09 и 0,11 мг N/л соответственно) [Лозовик, Бородулина, 2009].

При статистической обработке гидрохимических данных изученных притоков выявлена статистически значимая разница в содержании аммонийного азота в 2015–2016 гг. по сравнению с 2001–2002 гг., свидетельствующая о его снижении. Между этими же периодами в нижнем течении р. Суна наблюдалась статистически значимая разница в концентрациях $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$, что подтверждает снижение фосфорной нагрузки на эту реку. Статистически значимая разница между 2001–2002 и 2015–2016 гг. наблюдалась и в содержании нитритов в Кондопожском канале, которая, однако, находилась в пределах погрешности метода определения.

Таблица 2. Средневзвешенное содержание биогенных элементов в воде крупнейших притоков Онежского озера и их водный сток (Q) в различные периоды

Table 2. The weighted average concentrations of nutrients (C) in the water of the largest tributaries of Lake Onego and their discharge (Q) in different periods

Река River	Период Period	Q, км³/год km³/year	P-PO ₄	P _{общ} TP	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	N _{орг} TON	N _{общ} TN
			мкг/л µg/L		мг/л mg/L				
Водла Vodla	2001–2002	4,00	7	32	0,11	0,001	0,02	0,55	0,68
	2007–2008	4,54	25	91	0,04	0,001	0,03	0,59	0,66
	2015–2016	3,92	9	40	0,04	0,001	0,06	0,54	0,64
Шуя Shuya	2001–2002	2,19	8	36	0,08	0,001	0,07	0,48	0,64
	2007–2008	2,97	9	40	0,09	0,001	0,05	0,37	0,52
	2015–2016	2,48	9	41	0,04	0,001	0,06	0,52	0,61
	2021	3,26	19	46	0,08	0,001	0,08	0,43	0,59
Суна (Кондопожский канал) Suna (Kondopoga Canal)	2001–2002	1,54	1	8	0,08	0,001	0,04	0,53	0,66
	2007–2008	2,24	1	11	0,03	0,002	0,09	0,39	0,51
	2015–2016	2,50	2	11	0,03	0,001	0,08	0,29	0,39
Суна (нижнее русло) Suna (lower reach)	2001–2002	0,17	105	146	0,39	0,022	0,18	0,60	1,19
	2007–2008	0,23	46	81	0,07	0,002	0,03	0,61	0,71
	2015–2016	0,19	5	31	0,03	0,001	0,02	0,58	0,64

Биогенная нагрузка на Онежское озеро от основных его притоков

Главными поставщиками биогенных элементов в Онежское озеро являются реки Водла и Шуя (табл. 3). Речной сток минеральных форм фосфора в Онежское озеро в большинстве случаев не превышал 28 % от $P_{\text{общ}}$, за исключением р. Шуи в 2021 г. (40 % от стока $P_{\text{общ}}$) и нижнего русла р. Суны в 2001–2002 и 2007–2008 гг. (72 и 61 % от стока $P_{\text{общ}}$ соответственно). Повышение стока $P_{\text{мин}}$ с водами р. Шуи в 2021 г. связано с тем, что помимо увеличения водного стока в ее воде повысилась концентрация $P_{\text{мин}}$ по сравнению с предыдущими периодами исследования (табл. 2). Причиной этого мог стать выход из строя очистных сооружений, а также увеличение фосфорной нагрузки от сельскохозяйственных предприятий, в том числе рыбоводческих ферм, действующих на ее водосборе. Нижнее русло р. Суны в 2001–2002 и 2015–2016 гг. находилось под влиянием сточных вод птицеводческой фермы, которая в настоящий момент закрыта.

Из форм азота в озеро с реками поступают преимущественно органические соединения (72–91 % от стока $N_{\text{общ}}$) (табл. 3). Поступление аммонийного и нитратного азота было близким, в некоторых случаях с преобладанием последнего. Однако наблюдались и исключения: в 2001–2002 гг. в стоке азота с реками Водла и Суна (оба русла) преобладала аммонийная форма, как и в стоке р. Шуи и нижнего течения р. Суны в 2007–2008 гг., что свидетельствует об экологических проблемах, связанных с антропогенным воздействием в эти периоды.

Статистически значимые изменения ($p = 0,04$), свидетельствующие об увеличении фосфорной нагрузки, произошли в поступлении $P_{\text{мин}}$ с р. Шуей в 2007–2008 гг. по сравнению с 2001–2002 гг. Поскольку содержание $P_{\text{мин}}$ в эти периоды было близким, увеличение связано с возрастанием водного стока в 2007–2008 гг. (табл. 3), что свидетельствует о распределенном источнике этого загрязнения. Для р. Водлы и обоих русел р. Суны статистически значимые различия наблюдались только для периодов 2001–2002 и 2015–2016 гг. В 2001–2002 и 2007–2008, а также 2007–2008 и 2015–2016 гг. различия для этих рек не выявлены, предположительно потому, что изменения химического состава крупных рек происходят медленно и не проявились за столь короткий промежуток времени (5–7 лет). В 2015–2016 гг. по сравнению с 2001–2002 гг. произошло уменьшение аммонийной нагрузки от р. Водлы ($p = 0,04$), что, возможно, связано со снижением антропогенного влияния на ее водосборной территории, в том числе и в результате сокращения численности населения [Всероссийская..., 2002; Росстат..., 2023]. Отмечено снижение поступления $P_{\text{мин}}$ ($p = 0,02$) и аммонийного азота ($p = 0,02$) с водами нижнего русла р. Суны, что объясняется закрытием птицефабрики. Статистически значимая разница в стоке $P_{\text{общ}}$ ($p = 0,04$) и нитратов ($p = 0,02$) также установлена для Кондопожского канала. Увеличение биогенной нагрузки могло быть связано с изменением как их содержания, так и водного стока (табл. 3). При этом статистически значимой разницы в суммарной биогенной нагрузке

Таблица 3. Среднегодовой вынос биогенных элементов с крупнейшими притоками Онежского озера в различные периоды

Table 3. Average annual nutrients load from the largest tributaries of Lake Onego in different periods

Река River	Период Period	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$N_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$
		т P/год t P/year	т P/год t P/year	т N/год t N/year				
Водла Vodla	2001–2002	27	126	429	4	80	2200	2714
	2007–2008	116	413	186	7	148	2676	3010
	2015–2016	36	159	175	4	227	2100	2514
Шуя Shuya	2001–2002	17	78	183	2	159	1048	1392
	2007–2008	26	119	274	3	158	1102	1535
	2015–2016	22	103	93	2	141	1282	1514
	2021	61	151	259	4	244	1401	1907
Суна (Кондопожский канал) Suna (Kondopoga Canal)	2001–2002	2	12	128	2	58	822	1009
	2007–2008	2	25	65	5	203	866	1133
	2015–2016	4	27	69	3	199	720	987
Суна (нижнее русло) Suna (lower reach)	2001–2002	18	25	66	4	30	102	201
	2007–2008	11	18	15	0,5	7	141	162
	2015–2016	1	6	6	0,2	4	110	121

от трех основных притоков Онежского озера между изучаемыми периодами не отмечено (критерий ANOVA, $p \gg 0,05$).

Заключение

Проанализирована биогенная нагрузка на Онежское озеро от крупнейших его притоков (рек Водла, Шуя и Суна) в 2001–2002, 2007–2008, 2015–2016 и 2021 (только для р. Шуя) годах. Выявлены изменения в поступлении с этими реками аммонийного и нитратного азота, $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$. В 2007–2008 гг. по сравнению с 2001–2002 гг. увеличилось поступление в Онежское озеро $P_{\text{мин}}$ с р. Шуйей за счет изменения ее водного стока. В 2015–2016 гг. сток аммонийного азота с р. Водлой отличается от аналогичного параметра в 2001–2002 гг., что свидетельствует об уменьшении антропогенной нагрузки в связи с сокращением численности населения на водосборе реки, а также с изменением ее водного стока. Сокращение стока $P_{\text{мин}}$ и аммонийного азота с водами нижнего русла р. Суны в 2015–2016 гг. по сравнению с 2001–2002 гг. связано с закрытием птицефабрики. В этот же период увеличилась нагрузка $P_{\text{общ}}$ и нитратным азотом от Кондопожского канала, что может быть связано с изменением как их концентрации в воде, так и водного стока реки. Статистически значимых изменений общей биогенной нагрузки от трех основных притоков Онежского озера не отмечено.

Литература

- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике* / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Карта рыбных хозяйств* // Ассоциация форелеводов Карелии [Электронный ресурс]. 2023. URL: <http://kareliatrout.ru/karta-rybnyh-hozjajstv/> (дата обращения: 10.06.2024).
- Атлас Республики Карелия* / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Версо, 2021. 48 с.
- Бискэ Г. С.* Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск: Госиздат Карел. АССР, 1959. 307 с.
- Всероссийская перепись населения 2002 года* [Электронный ресурс]. 2002. URL: <http://www.perepis2002.ru/index.html?id=13> (дата обращения: 01.08.2024).
- Гидрохимия Онежского озера и его притоков* / АН СССР. Ин-т озероведения; Отв. ред. Н. Ф. Соловьева. Л.: Наука, 1973. 243 с.
- Китаев С. П., Ильмаст Н. В., Стерлигова О. П.* Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. 39 с.
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях* / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
- Лозовик П. А.* Геохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 56 с.
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С.* Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // *Водные ресурсы*. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.
- 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 натуральных 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
- Озера Карелии* / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Пирожкова Г. П.* Химический состав приточных вод бассейна Онежского озера // *Притоки Онежского озера*. Петрозаводск: Карел. науч. центр АН СССР, 1990. С. 4–36.
- Росстат.* Федеральная служба государственной статистики. Муниципальная статистика [Электронный ресурс]. 2023. URL: https://10.rosstat.gov.ru/municipal_statistics (дата обращения: 20.11.2023).
- Сабылина А. В.* Онежское озеро и его притоки. Химический состав воды притоков // *Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг.* Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. С. 21–29.
- Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б.* Химический состав Онежского озера и его притоков // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.
- 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. Vol. 17. Art. 100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619
- Hobbs W. O., Lafrancois B. M., Di Donato E.* Near-shore conditions of the Great Lakes national parks: A baseline water quality and toxicological assessment // *Park Science*. 2016. Vol. 32, no. 2. P. 36–45.
- Escudero-Oñate C.* Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, $\text{NO}_3\text{-N}$, Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn (ICP Waters report 129/2016). Oslo: Norwegian Institute for Water Research. Report No. 7081 – 2016. URL: <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2426546> (дата обращения: 20.11.2023).
- Khodzher T. V., Domysheva V. M., Sorokovikova L. M., Sakirko M. V., Tomberg I. V.* Current chemical composition of Lake Baikal water // *Inland Waters*. 2017. Vol. 7, no. 3. P. 250–258. doi: 10.1080/20442041.2017.1329982

References

- All-Russian population census of 2002. (In Russ.) URL: <http://www.perepis2002.ru/index.html?id=13> (accessed: 01.08.2024).
- A map of fish farms. *Assotsiatsiya forelevodov Karelii = Association of Trout Breeders of Karelia*. 2023. (In Russ.). URL: <http://kareliatrout.ru> (accessed: 10.06.2024).
- Biske G. S. Quaternary deposits and geomorphology of Karelia. Petrozavodsk: Gosizdat Karel. ASSR, 1959. 307 p. (In Russ.).
- Escudero-Oñate C. Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn (ICP Waters report 129/2016). Oslo: Norwegian Institute for Water Research. Report No. 7081 – 2016. URL: <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2426546> (accessed: 20.11.2023).
- Filatov N. N. (ed.). Atlas of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: Verso, 2021. 48 p. (In Russ.).
- Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.).
- Filatov N. N., Kukharev V. I. Lakes of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 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;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619
- Hobbs W. O., Lafrancois B. M., Di Donato E. Near-shore conditions of the Great Lakes national parks: A baseline water quality and toxicological assessment. *Park Science*. 2016;32(2):36–45.
- Khodzher T. V., Domyshcheva V. M., Sorokovikova L. M., Sakirko M. V., Tomberg I. V. Current chemical composition of Lake Baikal water. *Inland Waters*. 2017;7(3):250–258. doi: 10.1080/20442041.2017.1329982
- Kitaev S. P., Il'mast N. V., Sterligova O. P. Assessment methods of trout farm nutrient load on water ecosystems. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. 39 p. (In Russ.).
- Lozovik P. A. Geochemical criteria for the state of surface waters of the humid zone and their resistance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Moscow, 2006. 56 p. (In Russ.).
- Lozovik P. A., Borodulina G. S. Nitrogen compounds in the surface and subsurface waters of Karelia. *Water Resources*. 2009;36(6):672–682. doi: 10.1134/S0097807809060062
- Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondratyev 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 Karelian Research Centre RAS*. 2016;5:35–52. (In Russ.). doi: 10.17076/lim303
- 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 Karelian Research Centre RAS*. 2020;4:62–74. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1189
- Pirozhkova G. P. Chemical composition of tributary waters of the Lake Onego basin. *Pritoki Onezhskogo ozera = Tributaries of Lake Onego*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1990. P. 4–36. (In Russ.).
- Rosstat, 2023. Federal statistical survey. Municipal districts indicators. (In Russ.). URL: https://10.rosstat.gov.ru/municipal_statistics (accessed: 20.11.2023).
- Sabylina A. V. Lake Onego and its tributaries. Chemical composition of the tributaries water. *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg. = Status of water objects in the Republic of Karelia. According to 1998–2006 monitoring results*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. P. 21–29. (In Russ.).
- Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Water chemistry in Onega Lake and its tributaries. *Water Resources*. 2010;37(6):842–853. doi: 10.1134/S0097807810060102
- Solov'eva N. F. (ed.). Hydrochemistry of Lake Onego and its tributaries. Leningrad: Nauka; 1973. 243 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию / received: 19.06.2024; принята к публикации / accepted: 16.08.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Галахина Наталия Евгеньевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник
лаб. гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: kulakovanata@mail.ru

Зобков Михаил Борисович

канд. техн. наук, руководитель лаб. гидрохимии
и гидрогеологии

e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Galakhina, Natalia

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

Zobkov, Mikhail

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

УДК 504

ДИНАМИКА ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕРА БИЕНДА-СТЕММЕ (ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)

Г. Т. Фрумин^{1*}, А. С. Демешкин²

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

² Северо-Западный филиал НПО «Тайфун» (ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург,
Россия, 199397)

В статье рассмотрена динамика трофического статуса озера Биенда-Стемме (Западный Шпицберген) за период 2002–2019 гг. Актуальность проведенного исследования обусловлена тем, что трофический статус указанного водоема не был изучен и это не позволяло корректно определить пригодность его воды для питьевого и хозяйственного потребления жителями поселка Баренцбург. Оценка трофического статуса озера Биенда-Стемме выполнена с использованием индекса трофического состояния (ITS), который ранее при изучении этого водоема не применялся. Установлено, что в обозначенный период трофический статус озера варьировал от ультраолиготрофного до эвтрофного. В среднем по величине ITS он характеризуется как мезотрофный. Выявлен значимый положительный тренд ITS за период 2002–2019 гг., что свидетельствует о возрастании трофического статуса озера Биенда-Стемме. Результаты исследования целесообразно применить для принятия эффективных управленческих решений о снижении антропогенной нагрузки на озеро.

Ключевые слова: озеро Биенда-Стемме; эвтрофирование; трофический статус; фосфор общий; климат

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Демешкин А. С. Динамика трофического статуса озера Биенда-Стемме (Западный Шпицберген) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 62–68. doi: 10.17076/lim1905

Финансирование. Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2023-0002.

G. T. Frumin^{1*}, A. S. Demeshkin². DYNAMICS OF THE TROPHIC STATUS OF LAKE BIENDA-STEMME (WEST SPITSBERGEN)

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

² North-Western Branch of the Typhoon Research and Production Association (38 Beringa St., 199397 St. Petersburg, Russia)

The relevance of the study is associated with the fact that the trophic status of Lake Bienda-Stemme had not previously been studied, making it impossible to properly determine

the suitability of the lake water for drinking and household purposes for residents of the village of Barentsburg. The purpose of the work is to assess the dynamics of the trophic status of Lake Bienda-Stemme (West Spitsbergen). The article examines changes in the trophic status of Lake Bienda-Stemme for the period 2002–2019. The trophic state index (TSI) was used to assess the trophic status. This index has not previously been applied to Lake Bienda-Stemme. It was established that during the indicated period the trophic status of the lake varied from ultraoligotrophic to eutrophic. On average, the TSI-based trophic status of the lake is characterized as mesotrophic. A significant positive TSI trend was identified for the period 2002–2019, indicating an increase in the trophic status of Lake Bienda-Stemme. It is advisable to apply the results of the study to make effective management decisions on reducing the anthropogenic load on the lake.

Keywords: Lake Bienda-Stemme; eutrophication; trophic status; total phosphorus; climate

For citation: Frumin G. T., Demeshkin A. S. Dynamics of the trophic status of Lake Bienda-Stemme (West Spitsbergen). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 62–68. doi: 10.17076/lim1905

Funding. The activities were carried out at the Russian State Hydrometeorological University within state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project #FSZU-2023-0002.

Введение

Среди современных проблем водной экологии центральное место занимает проблема эвтрофирования [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990] (синонимы: эвтрофикация, евтрофирование, евтрофикация). Согласно ГОСТ 17.1.1.01-77, «эвтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов». При эвтрофировании происходит резкое увеличение биомассы и первичной продукции фитопланктона, появляются в массе сине-зеленые водоросли, вызывающие «цветение» воды, происходят структурные изменения в сообществах. Поскольку эвтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО началась активная деятельность, связанная с мониторингом внутренних вод и контролем за эвтрофированием водоемов земного шара. Эта работа проводится в разных странах и на разных континентах [Дмитриев, Фрумин, 2004].

Вследствие упрощенности экосистем северные озера более уязвимы к загрязнениям в сравнении с озерами других регионов, поэтому возрастающее по мере их освоения антропогенное воздействие вызывает серьезную озабоченность. Северные водоемы характеризуются высокой чувствительностью к любым изменениям факторов среды как по естественным причинам, так и в результате антропогенного воздействия. Арктические экосистемы, с одной стороны, ограничены сравнительно

узким ареалом и за длительный период адаптировались к специфическим экстремальным условиям, а с другой – характеризуются как наиболее чувствительные и уязвимые экосистемы, влияние климатических вариаций на которые является неоднозначным.

К настоящему времени разработано более пятидесяти критериев оценки трофического статуса водных объектов [Дмитриев, 1995]. Использование индексов трофии, среди которых наиболее популярным в последние годы является индекс Карлсона, не сняло проблему оценки трофности водной экосистемы [Фрумин, Мурадлы, 2020]. Вероятность ошибочной идентификации трофического статуса водоема может быть очень высокой в случаях использования: малоинформативных индексов; одного-единственного индекса трофического статуса; индекса или группы индексов, адаптированных для условий одной климатической зоны, для определения трофности водоемов в другой климатической зоне; индексов, полученных для водных экосистем циклического типа, для водных экосистем транзитного типа, а также проведения идентификации трофического статуса водоема по натурным исследованиям одного года (сезона, съемки) [Дмитриев, 1995].

Озеро Биенда-Стемме является источником воды питьевого и хозяйственного назначения для жителей поселка Баренцбург [Демин и др., 2011]. Это ледниковое озеро расположено на противоположном от поселка берегу залива Гренфьорд. По трубопроводу, проложенному по дну залива, вода поступает в Баренцбург.

Особенностями этого региона являются его малонаселенность (плотность населения

0,05 чел./км²) и незначительная промышленная активность. Одной из основных нагрузок, оказывающих влияние на природу архипелага Шпицберген, является добыча угля и связанная с ней инфраструктура жилых поселков. В последние годы увеличивается нагрузка на экосистему и за счет туристической индустрии, соответственно возрастает количество авто- и мототранспорта, увеличивается число заходов судов в заливы, строится новая инфраструктура.

Цель исследования – оценка динамики трофического статуса озера Биенда-Стемме за период 2002–2019 гг. на основе применения индекса трофического состояния. Ранее подобные исследования не проводились.

Материалы и методы

Озеро Биенда-Стемме располагается на западном берегу залива Гренфьорд (арх. Шпицберген) (рис. 1). Архипелаг Шпицберген находится в Северном Ледовитом океане, в районе 78°09'25" с. ш. и 15°5'51" в. д. Координаты озера 78°3'18" с. ш. и 13°57'55" в. д.

Пробы воды отбирались в зимне-весенний (время наибольшего снегонакопления) и летне-осенний (июль–сентябрь) периоды с подповерхностного (0,5 м ниже поверхности) и придонного (0,5 м выше дна) горизонтов в 2002–2019 гг. В каждый сезон отбирали две пробы. Отбор проб воды производился Северо-Западным



Рис. 1. Залив Гренфьорд с указанием расположения озера Биенда-Стемме, масштаб карты 1:50 000 [Фрумин, Демешкин, 2023]

Fig. 1. Map of Grønfjord Bay showing the location of Lake Bienda-Stemme, map scale 1:50,000 [Frumin, Demeshkin, 2023]

филиалом (СЗФ) ФГБУ НПО «Тайфун». Гидрохимические исследования проб выполнялись в аккредитованной химико-аналитической лаборатории СЗФ ФГБУ «НПО «Тайфун».

Определение водородного показателя pH в воде производилось методом потенциометрии. Для проведения измерения использовался универсальный pH-метр-иономер И-500. Содержание растворенного кислорода определялось титриметрическим методом по количественной реакции йода, выделившегося при фиксации кислорода, с тиосульфатом натрия (модифицированный титриметрический метод Винклера) [РД 52.24.495-2005; РД 52.24.419-2005].

В качестве критерия трофности была выбрана величина pH при нормальном 100%-м насыщении воды кислородом – $pH_{100\%}$. В 1995 г. этот критерий трофности был запатентован (патент № 2050128, 20.12.1995). В монографии [Неверова-Дзюопик, Цветкова, 2020] приведено множество примеров применения индекса ITS для определения трофности водоемов и водотоков, расположенных на территории России и Польши.

Для оценки трофического статуса озера Биенда-Стемме использован индекс трофического состояния (ITS), рассчитываемый по следующей формуле:

$$ITS = \sum_{i=1}^n pH_i / n + a [100 - \sum_{i=1}^n [O_2]_i / n],$$

где pH_i – pH, измеренный за определенный период; $[O_2]$ – кислород, в процентах насыщения; n – количество измерений; a – коэффициент, определяемый по формуле:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i \cdot [O_2]) - \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i) \cdot \sum_{i=1}^n ([O_2])}{n}}{\sum_{i=1}^n [O_2]^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n [O_2])^2}{n}}$$

Уровень трофического статуса оценивали, используя классификацию, приведенную в табл. 1 [Фрумин, Хуан, 2012].

Таблица 1. Классификация критериев трофического статуса

Table 1. Classification of trophic status criteria

Трофический статус Trophic status	ITS
Ультраолиготрофный Ultraoligotrophic	6,3 ± 0,3
Олиготрофный Oligotrophic	7,0 ± 0,3
Мезотрофный Mesotrophic	7,7 ± 0,3
Эвтрофный Eutrophic	> 8,3 ± 0,3

Результаты и обсуждение

Показатель ITS характеризует состояние продукционно-деструкционного баланса, который является важнейшей функциональной характеристикой любых экосистем. Он основан на установленной эмпирической зависимости величины pH воды от насыщения ее кислородом, возникающей при эвтрофировании. В упрощенном виде это можно объяснить так: при увеличении скорости фотосинтеза концентрация диоксида углерода уменьшается, а pH воды, соответственно, увеличивается. Одновременно увеличивается насыщение воды кислородом и при цветении может достигать до 200 % и более.

Величина pH, рассчитанная по найденным зависимостям для нормального 100%-го насыщения воды кислородом, тем больше, чем выше трофический статус водоема, и может служить интегральным показателем его трофического состояния, т. е. состояния его биотического баланса [Алексеев и др., 2007].

Использование зависимости pH и $[O_2]$ очень удобно, так как и pH, и содержание кислорода измеряются при любых исследованиях водоемов уже более 100 лет. Измерение этих показателей доступно, достаточно точно, легко автоматизируется.

Результаты расчетов ITS представлены в табл. 2.

Таблица 2. Динамика трофического статуса озера Биенда-Стемме

Table 2. Dynamics of the trophic status of Lake Bienda-Stemme

Год Year	ITS	Трофический статус Trophic status
2002	7,6	Мезотрофный / Mesotrophic
2003	6,1	Ультраолиготрофный / Ultraoligotrophic
2004	7,6	Мезотрофный / Mesotrophic
2005	6,2	Ультраолиготрофный / Ultraoligotrophic
2006	6,8	Олиготрофный / Oligotrophic
2007	8,0	Мезотрофный / Mesotrophic
2008	7,3	Олиготрофный / Oligotrophic
2009	7,3	«
2010	7,5	Мезотрофный / Mesotrophic
2011	7,0	Олиготрофный / Oligotrophic
2012	7,7	Мезотрофный / Mesotrophic
2013	8,1	Эвтрофный / Eutrophic
2014	7,3	Олиготрофный / Oligotrophic
2015	7,8	Мезотрофный / Mesotrophic
2016	7,6	«
2017	8,0	«
2018	8,2	Эвтрофный / Eutrophic
2019	8,8	«
среднее average	7,5	Мезотрофный / Mesotrophic

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, трофический статус озера за рассмотренный период существенно варьировал от ультраолиготрофного в 2003 и 2005 гг. до эвтрофного в 2013, 2018 и 2019 гг. Ранее было отмечено, что вероятность ошибочной идентификации трофического статуса водоема может быть очень высокой в случаях использования данных одного года (сезона, съемки) [Дмитриев, 1995]. Для корректной оценки трофического статуса озера было рассчитано среднее значение ITS за период 2002–2019 гг. Оно составило 7,5, что характеризует трофический статус озера как мезотрофный. Различия ITS между горизонтами и сезонами не рассматривались.

Ранее при использовании метода вероятностной оценки установлено, что трофический статус озера Биенда-Стемме (по содержанию фосфора общего) в основном характеризуется как олиготрофно-мезотрофный (на 59 % олиготрофный и на 27 % мезотрофный) [Фруммин, Демешкин, 2023].

Для оценки тенденции ITS была построена диаграмма (рис. 2). Линия регрессии, приведенная на этом рисунке, описывается следующей формулой:

$$ITS = -161,88 + 0,0839 \text{год} \quad (1)$$

$$n = 18 \quad r = 0,665 \quad r^2 = 0,442 \quad \sigma_{Y(X)} = 0,518 \quad F_p = 12,69 \quad F_T = 4,45.$$

Здесь n – количество значений ITS, r – коэффициент корреляции, r^2 – коэффициент детерминации, $\sigma_{Y(X)}$ – стандартная ошибка, F_p и F_T – расчетное и табличное значения критерия Фишера при уровне значимости 95 %.

Так как $F_p > F_T$, зависимость (1) адекватна [Дрейпер, Смит, 1986]. Иными словами, линия регрессии, приведенная на рис. 2, свидетельствует о наличии положительного тренда, то есть об увеличении ITS и, соответственно, изменении трофического статуса озера в направлении его повышения.

На эвтрофирование водоемов оказывают влияние многие абиотические и биотические факторы. К абиотическим факторам относятся свет, прозрачность, мутность, температура и содержание биогенных веществ. Потепление климата (повышение температуры воздуха), возможно, ключевой фактор, определяющий уровень трофического статуса (рис. 3). Согласно [Карандашева и др., 2021], в Баренцбурге

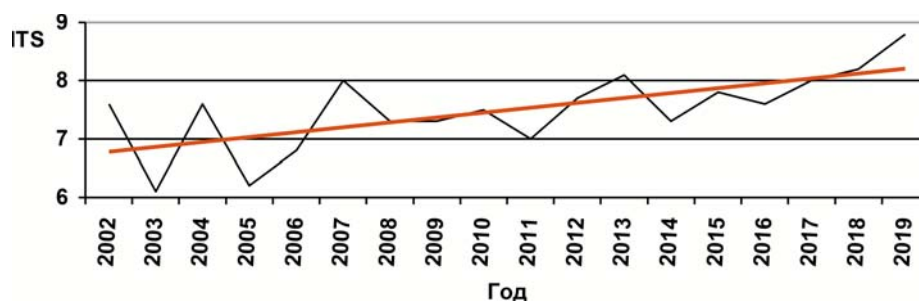


Рис. 2. Динамика индекса ITS
Fig. 2. Dynamics of the ITS index

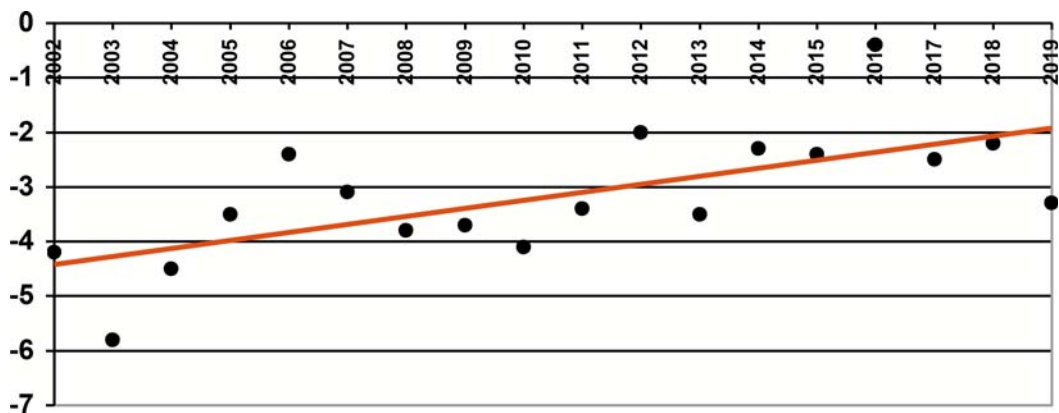


Рис. 3. Динамика среднегодовой температуры приземного слоя атмосферы (Баренцбург)
Fig. 3. Dynamics of the average annual temperature of the surface layer of the atmosphere (Barentsburg)

30-летний «нормальный» период 1991–2020 гг. содержит устойчивую тенденцию к потеплению, что объективно отражает современную специфику климата исследуемого региона.

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

$$t = -298,42 + 0,147\text{Год} \quad (2)$$

$$n = 18 \quad r = 0,66 \quad r^2 = 0,44 \quad \sigma_{Y(X)} = 0,92 \quad F_p = 12,38 \quad F_T = 4,45.$$

Так как $F_p > F_T$, зависимость (2) адекватна. Линия регрессии на рис. 3 свидетельствует о наличии положительного тренда, то есть об увеличении температуры приземного слоя атмосферы за период 2002–2019 гг.

Заключение

Озеро Биенда-Стемме – основной источник воды питьевого и хозяйственного назначения для жителей поселка Баренцбург. Впервые на основе запатентованного индекса трофического состояния (ITS) проведена оценка трофического статуса озера за 2002–2019 гг. Установлено, что за этот период трофический статус озера в основном характеризуется как мезотрофный. Выявлен значимый положительный тренд ITS за указанный период, что свидетельствует о возрастании трофического статуса озера Биенда-Стемме.

Литература

Алексеев М. И., Цветкова Л. И., Копина Г. И. Методика расчетов региональных нормативов экологического благополучия водных объектов (Невской губы и восточной части Финского залива). СПб.: СПбГАСУ, 2007. 36 с.

Демин Ю. Н., Граевский А. П., Демешкин А. С., Власов С. В., Крылов С. С., Лалетин Н. А. Состояние и тенденции изменения загрязнения окружающей среды в местах хозяйственной деятельности предприятий на архипелаге Шпицберген (поселок Баренцбург и сопредельные территории) за период 2002–2010 гг. СПб.: АНИИ, 2011. 316 с.

Дмитриев В. В. Диагностика и моделирование водных экосистем. СПб.: СПбГУ, 1995. 215 с.

Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: СПбГУ, РГГМУ, 2004. 294 с.

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

Карандашева Т. К., Демин В. И., Иванов Б. В., Ревина А. Д. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX–XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы // Российская Арктика. 2021. № 13. С. 26–39. doi: 10.24412/2658-4255-2021-2-26-39

Неверова-Дзюпик Е., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.

РД 52.24.495-2005. Руководящий документ. Водородный показатель и удельная электрическая проводимость вод. Методика выполнения измерений электрометрическим методом.

РД 52.24.419-2005. Руководящий документ. Массовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика выполнения измерений иодометрическим методом.

Фрумин Г. Т., Хуан Ж.-Ж. Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов. Методическое пособие. СПб.: РГГМУ, 2012. 28 с.

Фрумин Г. Т., Мурадлы М. А. Динамика трофического статуса Нарвского водохранилища (по данным 2011–2019 гг.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 65–71. doi: 10.17076/lim1300

Фрумин Г. Т., Демешкин А. С. Вероятностная оценка трофического статуса озера Биенда-Стемме (Западный Шпицберген) // Российская Арктика. 2023. Т. 5, № 4. С. 5–11. doi: 10.24412/2658-4255-2023-4-05-11

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.

References

Alekseev M. I., Tsvetkova L. I., Kopina G. I. A method for calculating regional standards for the ecological well-being of water bodies (Neva Bay and the eastern part of the Gulf of Finland). St. Petersburg: SPbGASU; 2007. 36 p. (In Russ.)

Demin Yu. N., Graevsky A. P., Demeshkin A. S., Vlasov S. V., Krylov S. S., Laletin N. A. State and trends in environmental pollution in places of economic activity of enterprises in the Spitsbergen Archipelago (Barentsburg village and adjacent territories) for the period 2002–2010. St. Petersburg: ANII; 2011. 316 p. (In Russ.)

Dmitriev V. V. Diagnostics and modeling of aquatic ecosystems. St. Petersburg: SPbGU; 1995. 215 p. (In Russ.)

Dmitriev V. V., Frumin G. T. Environmental regulation and sustainability of natural systems. St. Petersburg: SPbGU, RGGMU; 2004. 294 p. (In Russ.)

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

Frumin G. T., Huang J.-J. Probabilistic assessment of the trophic status of water bodies. Toolkit. St. Petersburg: RGGMU; 2012. 28 p. (In Russ.)

Frumin G. T., Muradly M. A. Dynamics of the trophic status of the Narva storage reservoir (2011–2019). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2020;9:65–71. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1300.

Frumin G. T., Demeshkin A. S. Probabilistic assessment of the trophic status of Lake Bienda-Stemme (Western Spitsbergen). *Rossiiskaya Arktika = Russian Arctic*. 2023;5(4):5–11. (In Russ.). doi: 10.24412/2658-4255-2023-4-05-11

Henderson-Sellers B., Markland H. R. Dying lakes. Causes and control of anthropogenic eutrophication. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1990. 280 p. (In Russ.)

Karandasheva T. K., Demin V. I., Ivanov B. V., Revina A. D. Air temperature changes in Barentsburg (Spitsbergen) in XX-XXI centuries. Justification for introducing a new climate standard. *Rossiiskaya Arktika = Russian Arctic*. 2021;13:26–39. (In Russ.). doi: 10.24412/2658-4255-2021-2-26-39

Neverova-Dziopik E., Tsvetkova L. I. Assessment of the trophic state of surface waters. St. Petersburg: SPbGASU; 2020. 176 p. (In Russ.)

RD 52.24.495-2005. Hydrogen indicator and specific electrical conductivity of water. Electrometric measurement technique. (In Russ.)

RD 52.24.419-2005. Mass concentration of dissolved oxygen in waters. Measurement method by iodometric method. (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 25.04.2024; принята к публикации / accepted: 23.08.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

д-р хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории факультета географии

e-mail: gfrumin@mail.ru

Демешкин Андрей Сергеевич

канд. геогр. наук, директор

e-mail: typhoon.ecol@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher, Research Laboratory, Faculty of Geography

Demeshkin, Andrey

Cand. Sci. (Geog.), Director

УДК 556.114.7(282.247.211)

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРО-КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

А. В. Сабылина, Т. А. Ефремова, О. И. Икко*

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*vos-olga-zenia@yandex.ru

В статье представлены результаты проведенного в марте 2021 г. исследования содержания биогенных, органических и взвешенных веществ в системе «снег на льду – лед – подледная вода» в центральной части Онежского озера и его крупнейших заливах (Петрозаводская и Кондопожская губы). Установлены закономерности распределения макро- и микроэлементов в сложной гидро-криогенной системе. Наибольшее содержание $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ выявлено в подледной воде. В снежном покрове Петрозаводской губы и центральной части озера среди азотсодержащих веществ преобладали нитраты, в Кондопожской губе – азот аммонийный; $P_{\text{общ}}$ был представлен преимущественно минеральными формами. Верхний слой льда исследованных районов озера характеризуется более высокими концентрациями биогенных веществ, чем нижний. В подледной воде в вершине Петрозаводской губы, куда впадает р. Шуя, преобладал $N_{\text{орг}}$, во внешней ее части – нитраты, в районе влияния очистных сооружений г. Петрозаводска – азот аммонийный, доля $P_{\text{мин}}$ уменьшалась от вершины залива к внешнему району (от 63 до 40 % от $P_{\text{общ}}$). В Кондопожской губе, подверженной влиянию сточных вод ЦБК, азот был представлен преимущественно минеральными формами, их доля снижалась от вершины к внешней части, тогда как в пространственном распределении форм фосфора наблюдалась обратная тенденция. Содержание органического вещества в снеге и во льду в исследованных районах Онежского озера было низким. Повышенная концентрация ОБ в подледной воде заливов по сравнению с центральной частью озера обусловлена влиянием речного стока и сточных вод.

Ключевые слова: снег на льду; лед; подледная вода; Кондопожская губа; Петрозаводская губа; Центральный плес озера

Для цитирования: Сабылина А. В., Ефремова Т. А., Икко О. И. Содержание органического вещества и биогенных элементов в гидро-криогенной системе Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 69–82. doi: 10.17076/lim1949

Финансирование. Финансовое обеспечение осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

A. V. Sabylina, T. A. Efremova, O. I. Ikko*. CONTENT OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS IN THE HYDRO-CRYOGENIC SYSTEM OF LAKE ONEGO

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *vos-olga-zenia@yandex.ru

The article presents the results of a survey of the content of nutrients, organic matter and suspended substances in the snow-on-ice/ice/under-ice-water system in the Central part of Lake Onego and its largest bays (Petrozavodsk Bay and Kondopoga Bay) carried out in March 2021. The study revealed patterns in the distribution of macro- and micro-nutrients in a complex hydro-cryogenic system. The highest content of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) was found in under-ice water. Nitrogen-bearing substances in the snow cover of Petrozavodsk Bay and the central part of the lake were dominated by nitrates, and in Kondopoga Bay by ammonium nitrogen; TP was chiefly represented by mineral forms. The upper layer of ice in the studied areas of the lake is characterized by higher concentrations of nutrients than the lower layer. In under-ice water at the top of Petrozavodsk Bay, where the Shuya River discharges, the prevalent form was total organic nitrogen (TON), in the outer part – nitrates, in the impact area of the Petrozavodsk City water treatment facilities – ammonium nitrogen; the share of inorganic phosphorus decreased from the top of the bay towards its outlet (from 63 to 40 % of TP). In Kondopoga Bay, affected by pulp and paper mill wastewater, nitrogen was represented mainly by mineral forms, their share decreasing from the top towards the outlet, whereas the trend in the spatial distribution of phosphorus forms was the opposite. The content of organic matter (OM) in snow and ice in the studied regions of Lake Onego was low. The higher OM concentration in under-ice water of the bays compared to the central part of the lake is due to the influence of river runoff and wastewater discharges.

Keywords: snow on ice; ice; under-ice water; Petrozavodsk Bay; Kondopoga Bay; Central part of Lake Onego

For citation: Sabylina A. V., Efremova T. A., Ikko O. I. Content of organic matter and nutrients in the hydro-cryogenic system of Lake Onego. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 69–82. doi: 10.17076/lim1949

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

Введение

Атмосферные осадки играют существенную роль в формировании химического состава поверхностных вод, при этом поступление веществ на сушу в различных климатических зонах отличается, и оно, как правило, увеличивается при переходе от зоны тундры к зоне субтропиков [Китаев, 1999]. Снег, обладая высокой сорбционной способностью, сохраняет свой геохимический состав до начала таяния [Алексеев, 2013]. В снежном покрове содержится информация как о локальной деятельности человека (промышленных центров, железных и автомобильных дорог), так и о веществах, поступивших из отдаленных районов.

Ледяной покров участвует в миграции биогенных, органических веществ и микроэлементов в водоем [Котляков, 1994]. При таянии льда биогенные элементы высвобождаются в поверхностные слои воды, где создаются благоприятные экологические условия для развития

гидробионтов, особенно в литоральных областях водоемов [Иванов, 1998; Сабылина, Рыжков, 2018]. Кроме того, со льдом может происходить перемещение химических, главным образом биогенных, веществ природного и антропогенного происхождения из загрязненных районов водоема в области, не подверженные прямому антропогенному влиянию.

Ледостав на Онежском озере в среднем продолжается с конца ноября по май (5–6 месяцев) [Ефремова, Пальшин, 2015], что обуславливает большой вклад снега и льда в поставку химических веществ в его воды. Значительный объем льдов, сформировавшихся в антропогенно загрязненных заливах Онежского озера (Кондопожская и Петрозаводская губы), выносятся в открытое озеро во время ледохода [Бояринов, Петров, 1991]. В литературе имеются обширные сведения о содержании и распределении биогенных и органических веществ в воде Онежского озера [Сабылина и др., 2010; Органическое ..., 2012, 2017; Лозовик и др., 2016;

Galakhina et al., 2022]. Однако данных по их содержанию во льду и снеге Онежского озера и других водных объектов, находящихся на территории республики и РФ в целом, мало [Анисимова, Роговская, 1974; Иванов, 1998; Воробьева и др., 2010; Алексеев, 2013; Сабылина, Ефремова, 2018; Сабылина и др., 2020]. Поэтому целью работы являлось изучение закономерностей распределения биогенных, органических и взвешенных веществ в системе «снег на льду – лед – подледная вода» и их вовлечения в лед из подледной воды на примере Петрозаводской и Кондопожской губ, подверженных антропогенному воздействию, и относительно чистого Центрального плеса Онежского озера.

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

Материалы и методы

Онежское озеро (площадь зеркала 9720 км²), расположенное между 60°53' и 64°55' с.ш., является одним из самых северных среди крупнейших озер мира, что обуславливает особенности его радиационного и термического режима. Онежское озеро отличается сложностью рельефа и морфологии котловины. Северная часть его котловины (80 %) находится в пределах Балтийского кристаллического щита, сложена коренными малорастворимыми породами (граниты, гнейсограниты и др.), а южная – в пределах осадочного чехла Русской платформы. Основная часть озерной котловины – Центральный плес (площадью 6610 км²) – заполнена олиготрофными маломинерализованными (38 мг/л) водами высокого качества с низким содержанием органического вещества ($C_{\text{орг}} = 6,5 \pm 0,5$ мг/л) и биогенных элементов ($P_{\text{общ}} = 8 \pm 1$ мкг/л, $N_{\text{общ}} = 0,39 \pm 0,07$ мг/л) [Сабылина, 2015; Galakhina et al., 2022]. Толщина льда в открытой части озера достигает 40–60 см.

Крупнейшие заливы Онежского озера – Петрозаводская и Кондопожская губы – испытывают существенное антропогенное влияние, связанное с поступлением сточных вод промышленных центров, расположенных на их побережьях [Сабылина, 1999, 2015; Galakhina et al., 2022].

Петрозаводская губа (площадь зеркала 73 км²) выделяется из всех губ озера высокой проточностью, период с учетом внешнего водообмена составляет 0,13 года (без учета – 0,38 года) [Лозовик и др., 2019]. В вершинную часть залива впадает второй по величине приток озера – р. Шуя (среднегодовой объем стока – 3,2 км³), воды которой содержат значительное

количество аллохтонного органического вещества гумусовой природы [Курапцева, Лозовик, 1991]. Во внешнюю часть Петрозаводской губы поступают сточные воды от очистных сооружений г. Петрозаводска, которые оказывают влияние на гидрохимический режим залива, главным образом в зимний период [Efremova et al., 2019]. Воды Петрозаводской губы являются маломинерализованными (34 мг/л) с повышенным содержанием органического вещества ($C_{\text{орг}} = 8,5 \pm 3,1$ мг/л) и биогенных элементов ($P_{\text{общ}} = 17 \pm 8$ мкг/л, $N_{\text{общ}} = 0,45 \pm 0,06$ мг/л) по сравнению с центральной частью озера [Сабылина, 2015; Galakhina et al., 2022]. Ледяной покров в Петрозаводской губе устанавливается в середине декабря, его толщина составляет 40–60 см, очищение залива ото льда происходит в начале мая [Озера..., 2013].

Кондопожская губа (площадь зеркала 223 км²) – один из крупнейших глубоководных заливов Онежского озера, в его вершинную часть через Кондопожский канал поступает около 95 % речного стока р. Суны (объем стока 2,4 км³), третьего притока по объему стока воды в озеро. В этот же район губы сбрасываются сточные воды Кондопожского промцентра, в среднем их объем составляет около 50 млн м³ в год [Государственный..., 2019–2021]. Вода залива характеризуется низкой минерализацией (38 мг/л), повышенным содержанием органического вещества ($C_{\text{орг}} = 8,0 \pm 4,1$ мг/л) и биогенных элементов ($P_{\text{общ}} = 24 \pm 31$ мкг/л, $N_{\text{общ}} = 0,40 \pm 0,10$ мг/л) по сравнению с центральной частью озера [Сабылина, 2015]. Ледяной покров в Кондопожской губе устанавливается в начале декабря, его толщина достигает 40–70 см, очищение ото льда происходит во второй половине мая [Озера..., 2013].

В среднем за год на зеркало Онежского озера выпадает 6,4 км³ атмосферных осадков, из них 55 % приходится на твердые осадки [Озера..., 2013; Ефремова, Пальшин, 2015].

Гидрохимические исследования снега на льду, льда и подледной воды проводились в Петрозаводской (ст. Р1, Р2, Р7, Р4) и Кондопожской (ст. К3, К50, К7) губах и Центральном плесе (ст. С3) Онежского озера с 17 по 31 марта 2021 г. (рис. 1). Эколого-геохимическое исследование гидро-криогенной (трехфазной) системы «снег на льду – лед – подледная вода» выполнено по ранее предложенной схеме [Сабылина, Ефремова, 2018], которая предусматривает разделение керна льда по его цвету на два образца: верхний слой «а», сравнительно старый, и нижний «б», более молодой. Расплав льда и снега проводили в лаборатории при температуре 20 °С.

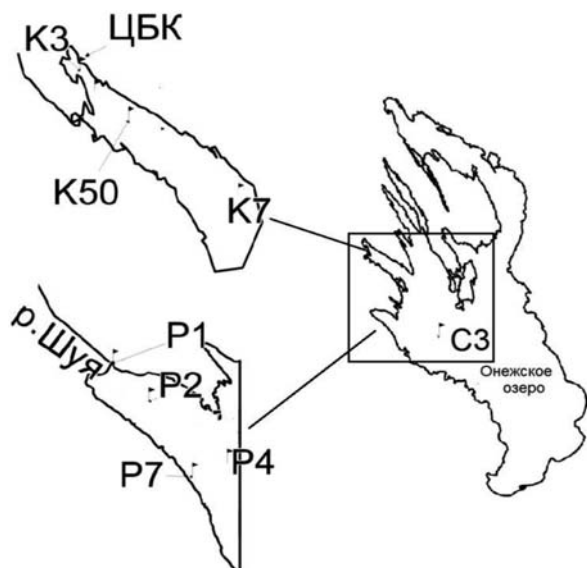


Рис. 1. Схема станций отбора проб снега на льду, льда и подледной воды в Онежском озере в марте 2021 г.

Fig. 1. Schematic map of snow, ice and under-ice water sampling stations in Lake Onego in March 2021

В пробах подледной воды, льда и снега определяли содержание биогенных элементов ($P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , $N_{\text{общ}}$, Si), органического вещества по косвенным его показателям (цветность, ПО и ХПК) и взвешенного вещества, анализы проводили по стандартным методикам [Аналитические..., 2017]. Концентрацию $N_{\text{орг}}$ рассчитывали по разности между $N_{\text{общ}}$ и суммой неорганических его форм. Содержание органического углерода определяли только в подледной воде фотохимическим методом с использованием персульфата аммония в качестве окислителя, а также ИК-спектроскопическим детектированием [Зобков, Зобкова, 2015].

Результаты и обсуждение

В гидро-криогенной системе трех исследованных районов Онежского озера наибольшее содержание $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ выявлено в подледной воде (табл. 1), за исключением ст. Р7, находящейся в зоне влияния очистных сооружений г. Петрозаводска. В снеге на этой станции концентрация $N_{\text{общ}}$ была выше в 1,3 раза по сравнению с подледной водой. Соотношение форм азота и фосфора в снеге, льду и подледной воде различалось. В снежном покрове Петрозаводской, Кондопожской губ и центральной части Онежского озера концентрации $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ изменялись в пределах 0,17–0,47 мг/л и 5–40 мкг/л соответственно (табл. 1). Минимальное содержание $N_{\text{общ}}$ установлено в вершине Петрозаводской губы (ст. Р1), в месте впадения

р. Шуи, максимальное – на ст. Р7, находящейся в зоне влияния очистных сооружений г. Петрозаводска. При этом в снеге на ст. Р1, расположенной в непосредственной близости от ООО «Соломенский лесозавод» и автомагистрали, обнаружена высокая концентрация $P_{\text{общ}}$ (табл. 1), который был представлен в основном $P_{\text{мин}}$ (85 % от $P_{\text{общ}}$), она почти в 2 раза превышала его содержание в подледной воде, а во льду – более чем в 4 раза. Среди форм азота в снеге большинства исследованных станций преобладали минеральные (в среднем 89 % от $N_{\text{общ}}$) и только на ст. Р7 $N_{\text{общ}}$ был представлен преимущественно органическими соединениями (57 % от $N_{\text{общ}}$).

В снежном покрове Петрозаводской губы среди минеральных форм азота преобладали нитраты (рис. 2), их среднее содержание составляло 0,12 мг N/л, что в 1,3 раза выше средней концентрации аммонийного азота. В Кондопожской губе, где существенное влияние оказывают аэрозольные поступления от Кондопожского ЦБК, в снежном покрове преобладает аммонийная форма азота (рис. 2). В снеге Центральной плеса озера на долю NH_4^+ приходится 39 %, NO_3^- – 56 % и $N_{\text{орг}}$ – 7 % от $N_{\text{общ}}$.

Среди форм фосфора в снеге большинства исследованных станций преобладал $P_{\text{мин}}$ (57–85 % от $P_{\text{общ}}$), и только на станциях Р7, К3 и К7 его доля не превышала 50 %.

Результаты исследований химического состава обоих образцов льда по вертикальному профилю в подверженных антропогенному влиянию Петрозаводской и Кондопожской губах показали, что верхний слой льда характеризуется более высокими концентрациями биогенных веществ, чем нижний (табл. 1).

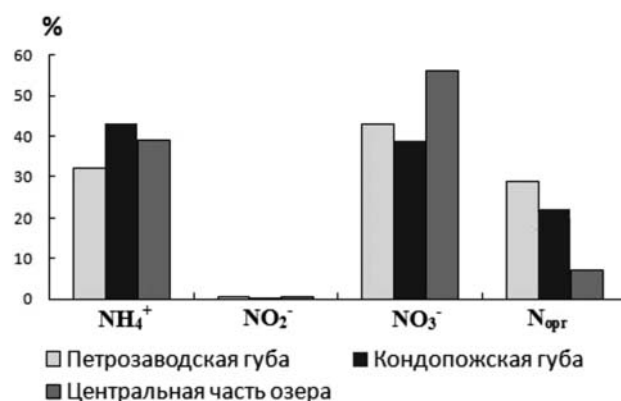


Рис. 2. Соотношение азотсодержащих соединений в снеге на льду в Петрозаводской и Кондопожской губах и центральной части Онежского озера в марте 2021 г.

Fig. 2. Ratio of nitrogen-containing compounds in snow on ice in Petrozavodsk Bay, Kondopoga Bay and the central part of Lake Onego in March 2021

Таблица 1. Содержание биогенных веществ в снеге, во льду и подледной воде в Онежском озере в марте 2021 г.
Table 1. Content of nutrients in snow, ice and under-ice water in Lake Onego in March 2021

№ станции Station number	Объект Object		NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	N _{общ} TN	N _{орг} TON	P _{мин} IP	P _{общ} TP	Si
			мгN/л mgN/L					мкг/л µg/L		мг/л mg/L
С3	Снег Snow		0,002	0,15	0,105	0,27	0,02	4	7	0,03
	Лед Ice	а	0,001	0,03	0,068	0,09	< 0,01	0	4	< 0,01
		б	0,001	< 0,01	0,116	0,12	< 0,01	1	4	< 0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,19	0,031	0,40	0,17	3	6	0,39
P1	Снег Snow		0,002	0,04	0,103	0,17	0,03	34	40	0,06
	Лед Ice	а	0,004	0,03	0,096	0,20	0,07	4	10	0,19
		б	0,002	< 0,01	0,069	0,07	< 0,01	7	8	0,04
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,12	0,028	0,49	0,34	15	24	2,71
P2	Снег Snow		0,002	0,18	0,092	0,28	< 0,01	4	6	0,06
	Лед Ice	а	0,004	0,12	0,098	0,31	0,09	2	4	0,11
		б	0,002	< 0,01	0,062	0,10	0,04	1	4	0,05
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,16	0,015	0,44	0,27	7	16	1,51
P7	Снег Snow		0,001	0,11	0,092	0,47	0,27	4	13	0,01
	Лед Ice	а	0,004	0,13	0,113	0,25	0,01	2	7	0,05
		б	0,002	< 0,01	0,063	0,07	< 0,01	1	5	< 0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,07	0,184	0,36	0,11	5	12	0,79
P4	Снег Snow		0,001	0,14	0,067	0,21	< 0,01	3	5	< 0,01
	Лед Ice	а	0,004	0,03	0,087	0,13	0,01	3	6	0,02
		б	0,002	< 0,01	0,053	0,06	< 0,01	3	4	0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,18	0,031	0,36	0,14	4	10	0,79
K3	Снег Snow		0,002	0,12	0,102	0,31	0,09	10	20	0,01
	Лед Ice	а	0,004	0,02	0,067	0,13	0,04	1	7	0,03
		б	0,002	< 0,01	0,050	0,06	0,01	4	5	0,01
Подледная вода Under-ice water			0,002	0,14	0,232	0,48	0,10	1	20	1,94
K50	Снег Snow		0,001	0,07	0,107	0,22	0,05	13	22	0,02
	Лед Ice	а	< 0,001	0,01	0,060	0,09	0,02	23	29	0,04
		б	0,001	< 0,01	0,052	0,06	< 0,01	2	3	< 0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,19	0,051	0,34	0,10	10	20	0,87
K7	Снег Snow		0,001	0,07	0,083	0,16	0,01	4	9	< 0,01
	Лед Ice	а	0,002	0,03	0,084	0,13	0,01	2	2	< 0,01
		б	0,002	< 0,01	0,072	0,08	< 0,01	1	3	< 0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,23	0,044	0,38	0,11	4	10	0,38

Примечание. Здесь и в табл. 4, 5: а – верхний слой льда, б – нижний слой льда.

Note. Here and in Tables 4, 5: a – top layer of ice, б – bottom layer of ice.

В ледяном покрове исследованных районов озера концентрация аммонийного азота в 1,2–6,5 раза выше, чем в подледной воде (табл. 1). Среди азотсодержащих соединений во льду Петрозаводской и Кондопожской губ среди форм азота преобладают ионы аммония (табл. 2).

Содержание общего фосфора, как и соединений азота, выше в верхнем слое льда исследованных районов Онежского озера и изменялось в пределах 2–29 мкг/л (в среднем 9) и меньше в нижнем – 3–8 мкг/л (в среднем 5). При этом около 85 % $P_{\text{общ}}$ приходится на минеральные формы. Средняя концентрация $P_{\text{мин}}$ в снеге Петрозаводской и Кондопожской губ

выше соответственно в 4 и 1,7 раза по сравнению с подледной водой, а во льду она выше в 11 и 1,7 раза (табл. 3).

В ледяном покрове Петрозаводской губы содержание $P_{\text{общ}}$ изменяется в узких пределах, и в разных по возрасту слоях льда оно близкое: в образце «а» – 4–9 мкг/л (в среднем 7 мкг/л), в образце «б» – 4–8 мкг/л (в среднем 5) (рис. 3). Концентрация $P_{\text{общ}}$ в ледяном покрове Кондопожской губы изменялась от 2 до 29 мкг/л (рис. 4). Максимальная концентрация $P_{\text{общ}}$ обнаружена в верхнем слое льда на ст. К50, что в 1,4 раза выше, чем в подледной воде (см. табл. 1).

Таблица 2. Соотношение азотсодержащих соединений (мгN/л) во льду Петрозаводской и Кондопожской губ в марте 2021 г.

Table 2. Ratio of nitrogen-containing compounds (mgN/L) in ice in Petrozavodsk and Kondopoga Bays in March 2021

	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	Кондопожская губа Kondopoga Bay
Верхний слой льда Top layer of ice	$\text{NO}_2^- < \text{N}_{\text{орг}} = \text{NO}_3^- < \text{NH}_4^+$ 0,002 0,06 0,06 0,1	$\text{NO}_2^- < \text{N}_{\text{орг}} = \text{NO}_3^- < \text{NH}_4^+$ 0,002 0,02 0,02 0,07
Нижний слой льда Bottom layer of ice	$\text{NO}_2^- < \text{N}_{\text{орг}} < \text{NO}_3^- < \text{NH}_4^+$ 0,002 0,02 0,04 0,06	$\text{NO}_2^- < \text{NO}_3^- < \text{N}_{\text{орг}} < \text{NH}_4^+$ 0,002 0,01 0,02 0,06

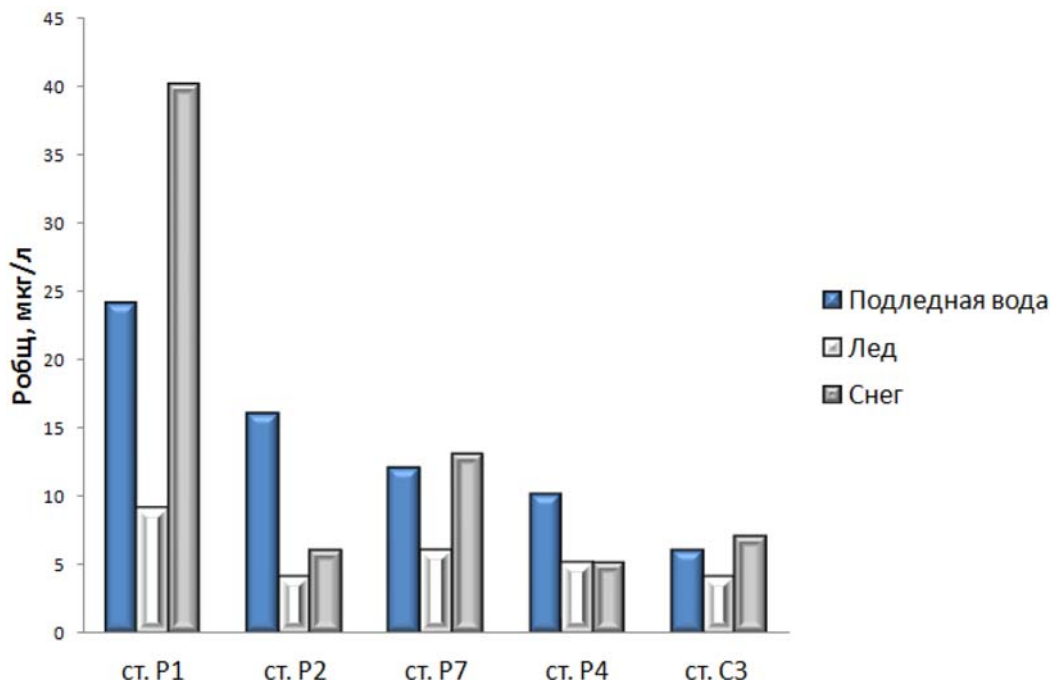


Рис. 3. Распределение концентрации общего фосфора в снеге на льду, во льду (среднее значение) и подледной воде в Петрозаводской губе (ст. P1, P2, P7, P4) и Центральном плесе (ст. C3) Онежского озера в марте 2021 г.

Fig. 3. Distribution of total phosphorus concentration in snow on ice, in ice (average value) and under-ice water in Petrozavodsk Bay (st. P1, P2, P7, P4) and in Central reach (st. C3) of Lake Onego in March 2021

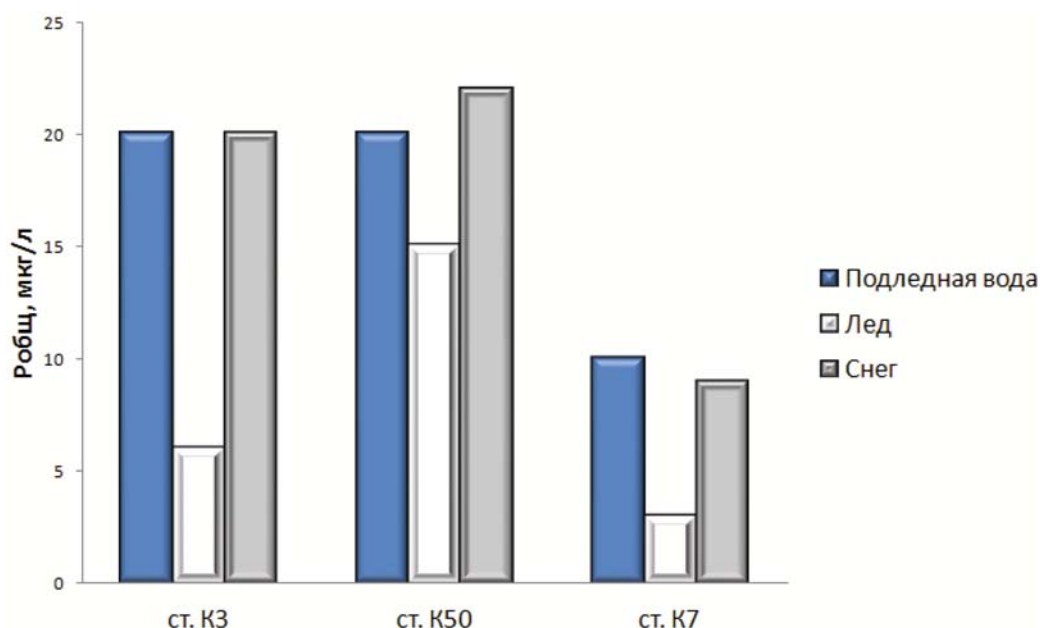


Рис. 4. Распределение концентрации общего фосфора в снеге на льду, во льду (среднее значение) и подледной воде в Кондопожской губе (ст. К3, К50, К7) Онежского озера в марте 2021 г.

Fig. 4. Distribution of total phosphorus concentration in snow on ice, in ice (average value) and under-ice water in Kondopoga Bay (st. K3, K50, K7) of Lake Onego in March 2021

Таблица 3. Среднее содержание $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ (мкг/л) в системе «снег на льду – лед – подледная вода» в Петрозаводской и Кондопожской губах в марте 2021 г.

Table 3. Average IP and TP content ($\mu\text{g/L}$) in the system «snow on ice – ice – under-ice water» in Petrozavodsk and Kondopoga Bays in March 2021

	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	Кондопожская губа Kondopoga Bay
Снег Snow	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 34 40	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 10 20
Лед Ice	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 3 6	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 6 8
Подледная вода Under-ice water	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 8 16	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 6 17

В Петрозаводской губе в системе «снег на льду – лед – подледная вода» средняя концентрация общего азота в подледной воде (0,41 мг/л) выше, чем в снеге и во льду, в 2,5 и 1,5 раза соответственно (рис. 5). В вершинном районе губы (ст. P1), где влияние высокогумусных вод р. Шуи велико, содержание $N_{\text{орг}}$ в подледной воде в 2,3 раза выше его минеральных форм (см. табл. 1). В центральном (ст. P2) и внешнем (ст. P4) районах губы суммарная концентрация минерального азота в подледной воде сравнима с органическим азотом. Однако в Кондопожской губе в подледной воде содержание $N_{\text{орг}}$ в 1,5–2 раза ниже, чем суммарная концентрация ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) (см. табл. 1).

Распределение химических веществ между льдом и подледной водой характеризуется коэффициентом вовлечения, который рассчитывается как отношение концентрации вещества во льду к концентрации вещества в подледной воде [Иванов, 1998]. Средние коэффициенты вовлечения аммонийного (NH_4^+) и фосфатного (PO_4^{3-}) ионов в лед в Петрозаводской губе составляют 2,7 и 0,5, а в Кондопожской – 1 и 1,4. Аммонийный азот – восстановленная форма азота, которая образуется при разложении органического вещества в водах. Концентрация органического вещества в подледных водах Петрозаводской губы ($C_{\text{орг}} = 15$ мг/л) в 2 раза выше, чем в водах

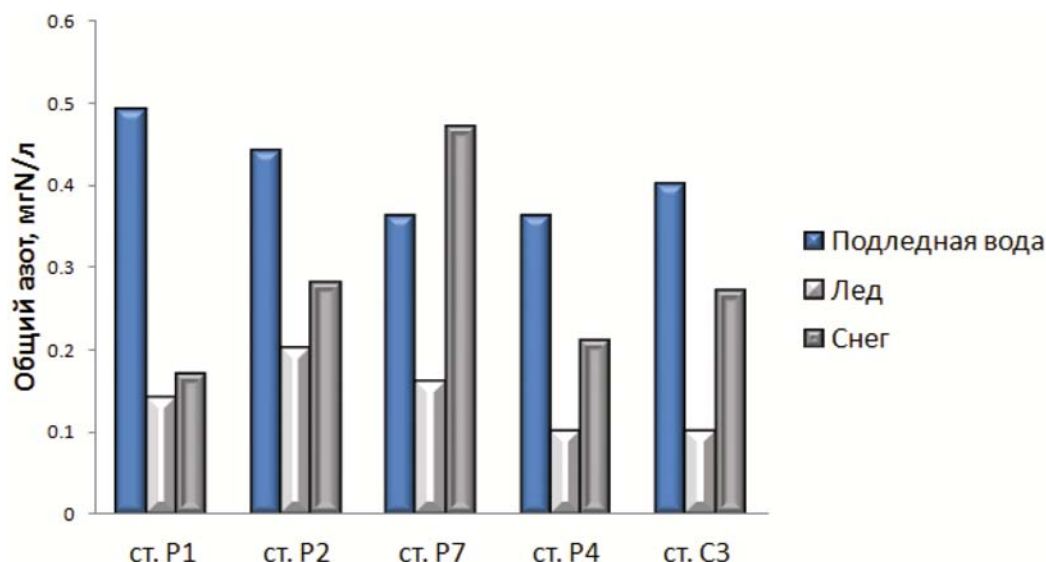


Рис. 5. Распределение концентрации общего азота в снеге, во льду (среднее значение) и подледной воде в Петрозаводской губе (ст. P1, P2, P7, P4) и Центральном плесе Онежского озера (ст. C3) в марте 2021 г.

Fig. 5. Distribution of total nitrogen concentration in snow, ice (average value) and under-ice water in Petrozavodsk Bay (st. P1, P2, P7, P4) and in Central reach of Lake Onego (st. C3) in March 2021

Кондопожской губы. Вовлечение в лед нитрат-ионов в среднем в 10 раз меньше, чем аммонийного иона (табл. 4). Высокий средний коэффициент вовлечения фосфатов в лед в Кондопожской губе обусловлен загрязненными сточными водами ЦБК. Так, в работе [Сергеев, Батюк, 1978] установлено, что дополнительное количество фосфатов образуется в водном растворе при размораживании льда, содержащего фосфорорганические вещества.

Высокая прозрачность пресноводного льда повышает проникновение солнечной радиации. При ледообразовании растущие кристаллы льда захватывают различные примеси, в том числе одноклеточные водоросли, и захваченная примесь имеет высокую подвижность [Ivanov, 1993]. Так, например, во льду Петрозаводской губы концентрация аммонийных (в среднем 0,08 мгN/л), нитратных (в среднем 0,04 мгN/л) и фосфатных (в среднем 6 мкг/л) ионов обеспечивает жизнедеятельность водорослей. С. Ф. Комулайнен с соавторами показали, что во льду небольших озер и рек Карелии среди водорослей преобладают диатомовые (*Aulacoseira islandica*, *Asterionella formosa*) (83 % общей численности) и цианобактерии (5 %) [Komulainen et al., 2012]. В полярных льдах Арктики и Антарктики насчитывается более 100 видов альгофлоры: численность клеток водорослей в ледовой фазе часто бывает

больше, чем в подледной воде [Melnikov, 1998; Мельников, 2003].

Содержание кремния в Петрозаводской губе в подледной воде составляет 0,79–2,71 мг/л (в среднем 1,4), а во льду – 0,01–0,19 мг/л (в среднем 0,06); причем его концентрация в верхних слоях льда в 2–5 раз выше, чем в нижних (см. табл. 1). Коэффициент вовлечения кремния в лед в Петрозаводской губе очень низкий и колеблется от 0,01 до 0,07 (в среднем 0,03), в Кондопожской – от 0,01 до 0,04 (в среднем 0,02). Так, например, в воде оз. Байкал коэффициент вовлечения SiO_2 в лед из подледной воды низкий и колеблется от 0,01 до 0,03 [Анисимова, Роговская, 1974].

Содержание ОВ в снежном покрове определяется множеством факторов, главными из которых являются действие локальных источников загрязнения и трансграничный перенос воздушных масс [Межрегиональное..., 1998]. Содержание органического вещества в снеге на льду в исследованных районах Онежского озера характеризуется как низкое (табл. 5). Диапазон концентраций по косвенному показателю ОВ (по ПО) варьирует от 0,32 до 2,11 мгО/л (в среднем 0,73 мгО/л), что согласуется с данными [Лозовик, Потапова, 2006; Потапова, 2011], согласно которым на территорию Республики Карелия с атмосферными осадками в среднем поступает 0,94 мгО/л ОВ (по ПО).

Таблица 4. Коэффициенты вовлечения биогенных веществ в лед в Петрозаводской и Кондопожской губах и центральной части Онежского озера в марте 2021 г.

Table 4. Coefficients of nutrients entrainment in ice in Petrozavodsk Bay, Kondopoga Bay and the central part of Lake Onego in March 2021

Станция Station	Объект Object	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	N _{орг} TON	P _{мин} TP	P _{общ} TP
Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay							
P1	а	4,0	0,2	3,4	0,2	0,3	0,4
	б	2,0	0,02	2,5	0,03	0,5	0,3
P2	а	4,0	0,07	6,5	0,3	0,3	0,3
	б	2,0	0,001	4,1	1,5	0,1	0,3
P7	а	4,0	1,1	0,6	0,1	0,4	0,6
	б	2,0	0,04	0,3	0,1	0,2	0,4
P4	а	4,0	0,2	2,8	0,07	0,8	0,6
	б	2,0	0,02	1,7	0,07	0,8	0,4
Кондопожская губа Kondopoga Bay							
K3	а	2	0,1	0,3	0,4	1,0	0,4
	б	1	0,01	0,2	0,1	4,0	0,3
K50	а	1	0,6	0,2	0,1	2,3	1,5
	б	1	0,02	2,1	0,2	0,2	0,2
K7	а	2	0,1	1,1	0,1	0,5	0,2
	б	2	0,001	1,9	0,1	0,3	0,3
Центральная часть Central part							
C3	а	1	0,12	2,0	0,06	<0,001	0,7
	б	1	0,05	3,7	0,06	0,3	0,7

Пространственное распределение ОВ в снеге Петрозаводской губы уменьшается от вершинного района (ПО – 0,84 мгО/л) к внешнему (ПО – 0,32 мгО/л) (табл. 5). Максимальная концентрация ОВ в снеге обнаружена в центральной части Кондопожской губы на ст. К50. Содержание ОВ (по ПО) и взвешенных веществ достигало 2,11 мгО/л и 24 мг/л соответственно (табл. 5), что, по всей видимости, обусловлено локальным переносом воздушных масс от Кондопожского ЦБК.

Содержание ОВ в ледяном покрове Петрозаводской, Кондопожской губы и Центрального плеса озера очень низкое. Характерным для всех отобранных кернов льда является повышенное содержание ОВ (по косвенным показателям) в старом по возрасту образце «а». В Петрозаводской губе в профильных колонках льда в его верхнем образце «а» цветность изменяется от 8 до 20 град., ПО – от 0,68 до 3,04 мгО/л, в Кондопожской губе – от 3 до 12 град. и от 0,44 до 2,15 мгО/л соответственно. В нижнем слое льда (образец «б») эти показатели содержания ОВ в Петрозаводской губе ниже в 2–6 раз, в Кондопожской – в 2,3–4,4 раза (см. табл. 5). Во льду Центрального плеса озера перманганатная окисляемость невысокая: в образце

«а» она равна 0,48 мгО/л, в образце «б» – 0,28 мгО/л. В работе [Немировская и др., 2015] авторы также отмечают очень низкие концентрации органических соединений в полярных льдах Антарктики и Арктики.

Подледные воды в Петрозаводской губе содержат большое количество ОВ аллохтонной природы, что обусловлено поступлением в залив вод р. Шуи с высоким содержанием гумусовых веществ. Косвенные показатели содержания ОВ в воде в вершинной части достигают высоких значений: цветность 186 град., ПО – 20,24 мгО/л, во внешней ее части они уменьшаются в 2,9 и 2,2 раза соответственно. Значение косвенных показателей ОВ в подледной воде в вершинной части Кондопожской губы (цветность – 80 град., ПО – 13,76 мгО/л) примерно в 2 раза выше, чем во внешней ее районе (см. табл. 3). Подледные воды Центрального плеса озера характеризуются следующими величинами содержания ОВ: цветность – 36 град., ПО – 7,04 мгО/л, ХПК – 17,6 мгО/л, С_{орг} – 7,10 мг/л.

Коэффициент вовлечения органического вещества в лед по косвенному показателю содержания ОВ (по ПО) и относительному содержанию ПО (лед) / ПО (вода) составляет в среднем 0,08, что говорит об очень низком вовлечении ОВ в лед.

Таблица 5. Значения косвенных и прямых показателей содержания органического вещества в снеге, во льду и подледной воде в Онежском озере в марте 2021 г.

Table 5. Values of indirect and direct indicators of organic matter content in snow, ice and under-ice water in Lake Onego in March 2021

№ станции Station number	Объект Object		Цветность Color	Взв. вещ-во Suspended matter	ПО COD _{Mn}	ХПК COD _{Cr}	С _{орг} TOC
			Град. mg Pt-Co/L	мг/л mg/L	мгО/л mgO/L	мгО/л mg/L	мг/л mg/L
С3	Снег Snow		6	1,5	0,72	3,1	н/о
	Лед Ice	а	1	0,3	0,48	6,3	н/о
		б	1	0,2	0,28	1,6	н/о
Подледная вода Under-ice water		36	1,0	7,04	17,6	7,10	
Р1	Снег Snow		5	10,8	0,84	3,1	н/о
	Лед Ice	а	20	5,0	3,04	н/о	н/о
		б	7	1,8	0,80	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		186	0,1	20,24	43,5	17,80	
Р2	Снег Snow		6	0,2	0,48	н/о	н/о
	Лед Ice	а	14	1,4	2,44	н/о	н/о
		б	4	0,6	0,40	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		126	1,0	15,2	36,3	13,41	
Р7	Снег Snow		3	0,6	0,44	н/о	н/о
	Лед Ice	а	8	1,4	1,20	н/о	н/о
		б	2	0,5	0,24	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		68	0,3	10,56	26,7	9,93	
Р4	Снег Snow		4	2,3	0,32	н/о	н/о
	Лед Ice	а	8	1,3	0,68	н/о	н/о
		б	2	0,4	0,32	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		65	3,7	9,36	24,7	11,09	
К3	Снег Snow		4	4,0	0,56	н/о	н/о
	Лед Ice	а	12	5,6	2,15	н/о	н/о
		б	4	1,9	0,49	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		80	1,1	13,76	32,1	12,63	
К50	Снег Snow		6	24,0	2,11	н/о	н/о
	Лед Ice	а	5	2,5	0,77	н/о	н/о
		б	3	1,3	0,28	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		44	0,6	6,94	22,0	8,01	
К7	Снег Snow		2	1,2	0,40	н/о	н/о
	Лед Ice	а	3	1,5	1,01	н/о	н/о
		б	3	1,1	0,44	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		32	0,2	8,2	16,5	6,0	

Примечание. н/о – не обнаружено.

Note. н/о – not found.

Выводы

Установлены особенности химического состава в системе «снег на льду – лед – подледная вода» на акватории Петрозаводской и Кондопожской губ и центральной части Онежского озера. Полученные данные по содержанию биогенных и органических веществ в сложной гидро-криогенной системе центральной части озера и крупнейших его заливов позволили установить основные закономерности распределения макро- и микроэлементов в изучаемой системе. В снеге на льду трех исследованных районов озера нитратный ион преобладает над аммонийным ионом. В вершинных районах губ, подверженных наиболее выраженному антропогенному влиянию, средние концентрации минерального фосфора в два раза выше, чем во льду, и близки к их содержанию в подледной воде. Содержание общего фосфора выше в верхнем слое льда и составляет в среднем 9, в нижнем слое – 4 мкг/л. При этом в общем фосфоре около 85 % приходится на минеральный. Коэффициент вовлечения минерального фосфора в лед в Петрозаводской губе равен 0,5, а в Кондопожской – 1,4. Концентрация общего азота в верхнем слое льда в среднем составляет 0,17 мгN/л, а в нижнем – в 2 раза меньше. Сумма минеральных форм азота (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) в верхнем и нижнем образцах льда преобладает над органическими, в среднем она равна 0,13 и 0,06 мгN/л соответственно. При этом на долю аммонийных ионов приходится 70 % суммы минеральных соединений азота. Коэффициент вовлечения аммонийного азота в лед в Петрозаводской губе высокий и составляет 0,2–6,5 (в среднем 3,3) и пониженный в Кондопожской губе – 0,1–0,4 (в среднем 0,2). Ледяной покров в Петрозаводской и Кондопожской губах и центральной части Онежского озера характеризуется низким содержанием ОВ. Коэффициент вовлечения в лед органического вещества (по перманганатной окисляемости) очень низкий (в среднем 0,08), при этом его содержание в верхних слоях льда выше, чем в нижних. Подледные воды Петрозаводской губы содержат большое количество органического вещества аллохтонной природы гумусового происхождения (средние величины: цветность – 111 град., ПО – 14 мгО/л). Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в подледной воде Петрозаводской губы в среднем составляет 13,1 мг/л, что в два раза выше, чем в Кондопожской губе, и в три раза – по сравнению с центральной частью озера.

Литература

- Алексеев В. Р. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения земель // Лед и Снег. 2013. Т. 53, № 1. С. 127–140. doi: 10.15356/2076-6734-2013-1-127-140
- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Анисимова Н. П., Роговская Л. Г. Изменение химического состава озерного льда во времени // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 128–137.
- Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 175 с.
- Воробьева И. Б., Напрасникова Е. В., Власова Н. В. Исследование гидрокриогенных компонентов юго-западного побережья Байкала (эколого-геохимический аспект) // Лед и Снег. 2010. № 2(110). С. 56–60.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2018 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; ред. кол.: А. Н. Громцев (гл. ред.), О. Л. Кузнецов, Г. Т. Шкиперова. Петрозаводск, 2019. 314 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; ред. кол.: А. Н. Громцев (гл. ред.), О. Л. Кузнецов, Г. Т. Шкиперова. Петрозаводск, 2020. 248 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; ред. кол.: А. Н. Громцев (гл. ред.), О. Л. Кузнецов, А. Е. Курило, Е. В. Веденцова. Петрозаводск, 2021. 277 с.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Многолетняя изменчивость температуры воды и ледовая фенология // Крупнейшие озера и водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 38–44.
- Зобков М. Б., Зобкова М. В. Устройство для определения органического углерода в воде с фотохимическим персульфатным окислением в системе непрерывного газового потока и ИК-Фурье спектрометрическим детектированием // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 8. С. 10–15.
- Иванов А. В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск: Дальнаука, 1998. 164 с.
- Китаев С. П. Коэффициенты изменения концентраций веществ в воде атмосферных осадков и их биомассы озер различных природных зон Европы и Северной Америки. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 40 с.
- Котляков В. М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 284 с.
- Курапцева С. В., Лозовик П. А. Химический сток воды р. Шуи и ее притоков // Поверхностные воды

озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1991. С. 183–189.

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

Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 1. С. 91–101. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

Лозовик П. А., Потапова И. Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.

Межрегиональное атмосферное загрязнение территорий. Республика Карелия / Под ред. В. Б. Милеева, М. С. Фещенко; НИИ охраны атмосферн. воздуха, Гос. ком. охраны окружающей среды по Респ. Карелия. СПб., 1998. 93 с.

Мельников И. А. Экосистемы морских льдов Антарктики: сравнительный анализ // Арктика и Антарктика. 2003. Вып. 2(36). С. 149–164.

Немировская И. А., Кравчишина М. Д., Реджепова З. Ю. Органические соединения и взвесь в снежно-ледяном покрове и почвах в районе антарктических станций России // Лед и Снег. 2015. Т. 55, № 4. С. 114–126. doi: 10.15356/2076-6734-2015-4-114-126

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

Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды V Всерос. симпозиума с междунар. участием (10–14 сентября 2012 г., Петрозаводск, Республика Карелия, Россия). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 465 с.

Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды VI Всерос. симпозиума с междунар. участием. Барнаул, 2017. 309 с.

Потапова И. Ю. Роль атмосферных осадков в формировании химического состава поверхностных вод Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 134–138.

Сабылина А. В. Гидрохимические исследования Онежского озера // Крупнейшие озера и водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 60–88.

Сабылина А. В., Ефремова Т. А. Химический состав льда и подледной воды Онежского озера (на примере Петрозаводской губы) // Лед и Снег. 2018. Т. 58, № 3. С. 417–428. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-417-428

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

Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков как индикатор экологического состояния // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.

Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Гидрохимическая характеристика литоральной зоны Онежского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 179–187. doi: 10.7868/S0321059618020074

Сабылина А. В. Современный гидрохимический режим Онежского озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. С. 58–109.

Сергеев Г. Б., Батюк В. А. Кримохимия. М.: Химия, 1978. 296 с.

Efremova T. A., Sabylina A. V., Lozovik P. A., Slaveykova V. I., Zobkova M. V., Pasche N. Seasonal and spatial variation in hydrochemical parameters of Lake Onego (Russia): insights from 2016 field monitoring // Inland Waters. 2019. Vol. 9(2). P. 227–238. doi: 10.1080/20442041.2019.1568097

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. Vol. 17. Art. 100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Ivanov A. V. Natural ice as a component of Biosphere // Proc. 8th Int. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice, ISY/Polar Ice Extent Workshop (1–5 February 1993. Mombetsu, Hokkaido, Japan). Mombetsu; 1993. P. 463–469.

Komulainen S., Slastina J., Klochkova M. Winter algae communities in the lakes and rivers ecosystems (Karelia, Russia) // Current advances in algal taxonomy and its applications: phylogenetic, ecological and applied perspective / Eds. K. Wolowski, I. Kaczmarek, J. Ehrman, A. Wojtal; W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences. Krakow, 2012. P. 243–251.

Melnikov I. A. Winter production of sea ice algae in the western Weddell Sea // J. Mar. Syst. 1998. Vol. 17. P. 195–205.

References

Alekseev V. R. Snow cover as an indicator of cumulative land pollution. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2013;53(1):127–140. (In Russ.). doi: 10.15356/2076-6734-2013-1-127-140

Anisimova N. P., Rogovskaya L. G. Changes in the chemical composition of lake ice over time. *Ozera krio-litozony Sibiri = Lakes of the Siberian cryolithozone*. Novosibirsk: Nauka; 1974. P. 128–137. (In Russ.)

Boyarinov P. M., Petrov M. P. The processes of thermal regime formation in deep freshwater reservoirs. Leningrad: Nauka; 1991. 175 p. (In Russ.)

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Long-term variability of water temperature and ice phenology. *Krupneishie ozera i vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and*

antropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 38–44. (In Russ.)

Efremova T. A., Sabylina A. V., Lozovik P. A., Slaveykova V. I., Zobkova M. V., Pasche N. Seasonal and spatial variation in hydrochemical parameters of Lake Onego (Russia): insights from 2016 field monitoring. *Inland Waters*. 2019;9(2):227–238. doi: 10.1080/20442041.2019.1568097

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia. Reference book. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 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;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Gromtsev A. N., Kuznetsov O. L., Shkiperova G. T. (eds.). State report on the environmental conditions in the Republic of Karelia in 2018. Petrozavodsk; 2019. 314 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N., Kuznetsov O. L., Shkiperova G. T. (eds.). State report on the environmental conditions in the Republic of Karelia in 2019. Petrozavodsk; 2020. 248 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N., Kuznetsov O. L., Kurilo A. E., Vedentsova E. V. (eds.). State report on the environmental conditions in the Republic of Karelia in 2020. Petrozavodsk; 2021. 277 p. (In Russ.)

Ivanov A. V. Cryogenic metamorphization of chemical composition of natural ice, freezing waters and ice-melt waters. Khabarovsk: Dal'nauka; 1998. 164 p. (In Russ.)

Ivanov A. V. Natural ice as a component of Biosphere. *Proc. 8th Int. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice, ISY/Polar Ice Extent Workshop (1–5 February 1993. Mombetsu, Hokkaido, Japan)*. Mombetsu, 1993. P. 463–469.

Kitaev S. P. Change coefficients of substances concentrations in atmospheric precipitation and their biomass in lakes of various natural areas of Europe and North America. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. 40 p. (In Russ.)

Komulaynen S., Slastina J., Klochkova M. Winter algae communities in the lakes and rivers ecosystems (Karelia, Russia). *Current advances in algal taxonomy and its applications: phylogenetic, ecological and applied perspective*. Krakow: Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences; 2012. P. 243–251.

Kotlyakov V. M. The world of snow and ice. Moscow: Nauka; 1994. 284 p. (In Russ.)

Kuraptseva S. V., Lozovik P. A. Chemical runoff of water from the Shuya River and its tributaries. *Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya = Surface waters of the Shuya lake-river system under conditions of anthropogenic impact*. Petrozavodsk: Kareliya; 1991. P. 183–189. (In Russ.)

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev A. V., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2016;5:35–52. (In Russ.). doi: 10.17076/lim303

Lozovik P. A., Efremenko N. A. (eds.). Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical

practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Potapova I. Yu. The receipt of chemicals with atmospheric precipitation into the territory of Karelia. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(1): 111–118. (In Russ.)

Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Assessing external water exchange of lake bays by water chemistry characteristics. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2019;46(1):94–102. (In Russ.). doi: 10.1134/S0097807818050123

Melnikov I. A. Sea ice ecosystems of Antarctica: a comparative analysis. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctic*. 2003;2(36):149–164. (In Russ.)

Melnikov I. A. Winter production of sea ice algae in the western Weddell Sea. *J. Mar. Syst.* 1998;17:195–205.

Milyaev V. B., Feshchenko M. S. (eds.). Interregional atmospheric pollution of territories. Republic of Karelia. St. Petersburg; 1998. 93 p. (In Russ.)

Nemirovskaya I. A., Kravchishina M. D., Redzhepova Z. U. Organic compounds and suspension in snow-ice covers and soils in the vicinities of the Russian Antarctic stations. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2015;55(4):114–126. (In Russ.). doi: 10.15356/2076-6734-2015-4-114-126

Organic matter and nutrients in inland reservoirs and sea waters. *Trudy V Seros. simpoziuma s mezhdunar. uchastiem (10-14 sent. 2012 g., Petrozavodsk, Respublika Kareliya, Rossiya) = Proceed. V All-Russ. Symposium with int. participation (Sept. 10-14, 2012. Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia)*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 465 p. (In Russ.)

Organic matter and nutrients in inland reservoirs and sea waters. *Trudy VI Seros. simpoziuma s mezhdunar. uchastiem = Proceed. VI All-Russ. Symposium with int. participation*. Barnaul; 2017. 309 p. (In Russ.)

Potapova I. Yu. The role of atmospheric precipitation in the formation of the chemical composition in surface waters of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2011;4:134–138. (In Russ.)

Sabylina A. V. Hydrochemical studies of Lake Onego. *Krupneishie ozera i vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyaniye i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and antropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 60–88. (In Russ.)

Sabylina A. V. The current hydrochemical regime of Lake Onego. *Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy = Lake Onego. Environmental problems*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. P. 58–109. (In Russ.)

Sabylina A. V., Efremova T. A. The chemical composition of ice and water under ice of Lake Onego (the case of Petrozavodsk Bay). *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2018;58(3):417–428. (In Russ.) doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-417-428

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

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. The chemical composition of water in Lake Onego and its tributaries as an indicator of the ecological state. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(6):717–729. (In Russ.)

Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Hydrochemical characteristics of the littoral zone of Lake Onego. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2018;45(2):179–187. (In Russ.). doi: 10.7868/S0321059618020074

Sergeev G. B., Batyuk V. A. *Cryochemistry*. Moscow: Chemistry; 1978. 296 p. (In Russ.)

Vorob'eva I. B., Naprasnikova E. V., Vlasova N. V. Study of the hydrocryogenic components on the Southwestern coast of Lake Baikal (ecological and geochemical aspect). *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2010;2(110):56–60. (In Russ.)

Zobkov M. B., Zobkova M. V. A device for determining organic carbon in water with photochemical persulfate oxidation in the system of continuous gas flow and FTIR spectrometric detection. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2015;81(8):10–15. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 21.08.2024; принята к публикации / accepted: 27.09.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сабылина Альбина Васильевна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Ефремова Татьяна Алексеевна

младший научный сотрудник лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Икко Ольга Игоревна

главный химик лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: vos-olga-zenia@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Sabylina, Albina

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Efremova, Tatyana

Junior Researcher

Ikko, Olga

Principal Chemist

УДК 574.583 (470.11)

СОСТАВ И СТРУКТУРА ПОДЛЕДНОГО ЗООПЛАНКТОНА РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР КЕНОЗЕРСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Е. И. Собко*, **С. И. Климов**, **Н. В. Неверова**, **О. Ю. Морева**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (пр. Никольский, 20, Архангельск,
Россия, 163020), *elfisina@yandex.ru*

Приводятся результаты исследований зоопланктонных сообществ разнотипных озер Кенозерского национального парка в подледный период 2014–2016 гг. Озера отличались происхождением и морфометрическими характеристиками. Изучены видовой состав, количественные характеристики, вертикальное распределение зоопланктона. Зооценозы представлены зимними и круглогодичными формами ракообразных и коловраток. В зимний период зоопланктон активно развивался, в сообществах наблюдались яйценозные самки копепод и коловраток, а также науплиусы копепод. Наибольшим количеством видов в сообществах представлены коловратки. Структурообразующий комплекс исследуемых зооценозов представлен 4–7 видами. Наибольшее количество видов (19) зарегистрировано в Лекшмозере. По численности в зооценозах доминировали веслоногие ракообразные, за исключением Лекшмозера, где в 2015 и 2016 году численно преобладали коловратки. Во все годы исследования в озерах по биомассе доминировали копеподы. В зависимости от года исследований численность зоопланктона в озерах составляла 8,4–66,7 тыс. экз./м³, биомасса – 0,08–0,45 г/м³. Максимальные значения численности и биомассы отмечены в озере Вильно, где сложились наиболее благоприятные кислородные условия. В подледный период зоопланктон в водоемах распределялся неравномерно. Большинство видов образовывали скопления в поверхностном и придонном горизонте. Некоторые формы зоопланктона были многочисленны только у дна или у поверхности. Поверхностные скопления организмов связаны с функционированием фитопланктона у кромки льда, придонные – с активностью анаэробных бактерий. Основными факторами, влияющими на развитие и распределение зоопланктона подо льдом, являлись длительность периода осенней конвекции, температурный и кислородный режим в водоемах и пищевой фактор.

Ключевые слова: охраняемые территории; озерные экосистемы; подледный зоопланктон; межгодовая изменчивость зоопланктона; вертикальное распределение

Для цитирования. Собко Е. И., Климов С. И., Неверова Н. В., Морева О. Ю. Состав и структура подледного зоопланктона разнотипных озер Кенозерского национального парка (Архангельская область) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 83–96. doi: 10.17076/lim1916

Финансирование. Работа подготовлена при финансовой поддержке темы ФНИР: FUUW-2022-0065 (№ гос. регистрации 122011800149-3).

E. I. Sobko*, S. I. Klimov, N. V. Neverova, O. Yu. Moreva. COMPOSITION AND STRUCTURE OF UNDER-ICE ZOOPLANKTON OF DIVERSE LAKES IN KENOZERSKY NATIONAL PARK (ARKHANGELSK REGION)

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

The article presents the results of studies on zooplankton communities of diverse lakes in Kenozersky National Park in the ice-covered period of 2014–2016. The lakes differed in their genesis and morphometric characteristics. The species composition, quantitative characteristics, and vertical distribution of zooplankton were studied. Zoocoenoses are represented by winter and perennial forms of crustaceans and rotifers. In winter, zooplankton developed actively, and the communities contained egg-bearing female copepods and rotifers, as well as nauplius copepods. Rotifers are the group represented by the largest number of species in the communities. The core that forms the structure of the communities is represented by 4–7 species. The number of species was the highest in Lake Lyokshmozero (19 species). In terms of numbers, the communities were dominated by copepods, except for Lyokshmozero, where rotifers quantitatively prevailed in 2015 and 2016. The biomass in the lakes was dominated by copepods in all years of the study. Depending on the year, the abundance of zooplankton in the lakes was 8,400–66,700 ind./m³, the biomass was 0.08–0.45 g/m³. The highest levels of abundance and biomass were found in Lake Vilna, which had the most favorable oxygen conditions. In the ice-covered period, zooplankton in the lakes was distributed unevenly. Most species formed clusters in the surface and bottom horizons. Some forms of zooplankton were numerous only at the bottom or at the surface. Surface aggregations of organisms are associated with the functioning of phytoplankton at the ice edge, bottom ones with the activity of anaerobic bacteria. The main factors influencing the development and distribution of zooplankton under ice were the duration of the autumn convection period, temperature and oxygen regimes in the lakes, and the food factor.

Keywords: protected areas; lake ecosystems; under-ice zooplankton; interannual variability of zooplankton; vertical distribution

For citation: Sobko E. I., Klimov S. I., Neverova N. V., Moreva O. Yu. Composition and structure of under-ice zooplankton of diverse lakes in Kenozersky National Park (Arkhangelsk Region). *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 83–96. doi: 10.17076/lim1916

Funding. The activities were financed within Basic Research Theme FUUV-2022-0065 (state registration no. 122011800149-3).

Введение

Озерные экосистемы играют важную роль в биосфере и жизни человека, являясь крупнейшими резервуарами питьевой воды на планете, а также средой обитания для многих видов гидробионтов. Водоемы чутко реагируют на изменения климата и антропогенную нагрузку. Проблема сохранения качества воды и биологических ресурсов пресноводных водоемов в настоящий момент приобрела глобальный характер. Важную роль в сохранении биологического разнообразия и снижении влияния антропогенной нагрузки на озерные экосистемы играют особо охраняемые природные территории (ООПТ), поэтому изучение функционирования экосистем озер и экологического состояния водоемов данных районов представляет большой интерес.

Гидробиологические исследования пресноводных водоемов, включая озерные экосистемы территорий ООПТ Архангельской области, носят системный характер, но большинство работ посвящено функционированию водных экосистем в летний период [Балушкина и др., 1997; Кузнецова, Баянов, 1999; Тиманова и др., 2006].

Зимние сообщества гидробионтов, в том числе и зоопланктона, в озерах различных регионов России исследованы недостаточно. Имеющиеся в литературе данные носят отрывочный характер. Наиболее подробно описаны зимние сообщества зоопланктона Рыбинского [Ривьер, 1982, 1986; Лазарева, Соколова, 2017] и Новосибирского [Ермолаева, 2000] водохранилищ, водоемов Волжского бассейна [Щербаков, 1967; Салахутдинов, 1985; Ривьер, 2012; Жданова, Малин, 2023], Южного Урала

[Речкалов, 2000], Карелии [Сярки, Фомина, 2017]. Для Архангельской области имеются сообщения о структуре и уровне развития зоопланктона в зимний период в карстовых озерах Пинежского заповедника [Баянов, 2005].

Данная работа посвящена исследованиям зимних сообществ зоопланктона разнотипных озер Кенозерского национального парка (КНП).

Цель работы – изучить состав и структуру, особенности распределения зоопланктона в подледный период в разнотипных озерах КНП (Лекшмозеро, Масельгское, Вильно).

Материалы и методы

Характеристика района и объектов исследования

Кенозерский национальный парк находится на юго-западе Архангельской области. Климат района умеренно-континентальный с продолжительной холодной многоснежной зимой, с короткой весной с неустойчивыми температурами, умеренно теплым влажным летом, продолжительной ненастной осенью. Средняя температура воздуха в январе -12°C , в июле $+16,5^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков –

500 мм. Устойчивый снеговой покров держится 160 дней. Безморозный период 105–110 дней [Национальные..., 1996].

Общая площадь парка составляет 1396 км². Территория покрыта множеством озер (более 250). По территории КНП между озерами Вильно и Масельгское проходит поросшая лесом озовая гряда, являющаяся границей водоразделов бассейнов Белого (Северный Ледовитый океан) и Балтийского (Атлантический океан) морей (рис. 1, водораздел обозначен пунктирной линией).

Озера Лекшмозеро и Вильно являются частью водосборных бассейнов левых притоков реки Онеги, впадающей в Онежский залив Белого моря. В Лекшмозеро впадает более 50 мелких притоков, сток происходит по р. Лекшма, впадающей в оз. Лача. Озеро Вильно также сточное, из него вытекает р. Виленка. Озеро Масельгское относится к водосборному бассейну Балтийского моря, представляет собой узкий по форме водоем, вытянутый в северо-западном направлении. Наибольшие глубины находятся в северо-восточной и северо-западной части озера. Южная часть водоема мелководна. Морфометрические и гидрографические характеристики озер приведены в табл. 1.

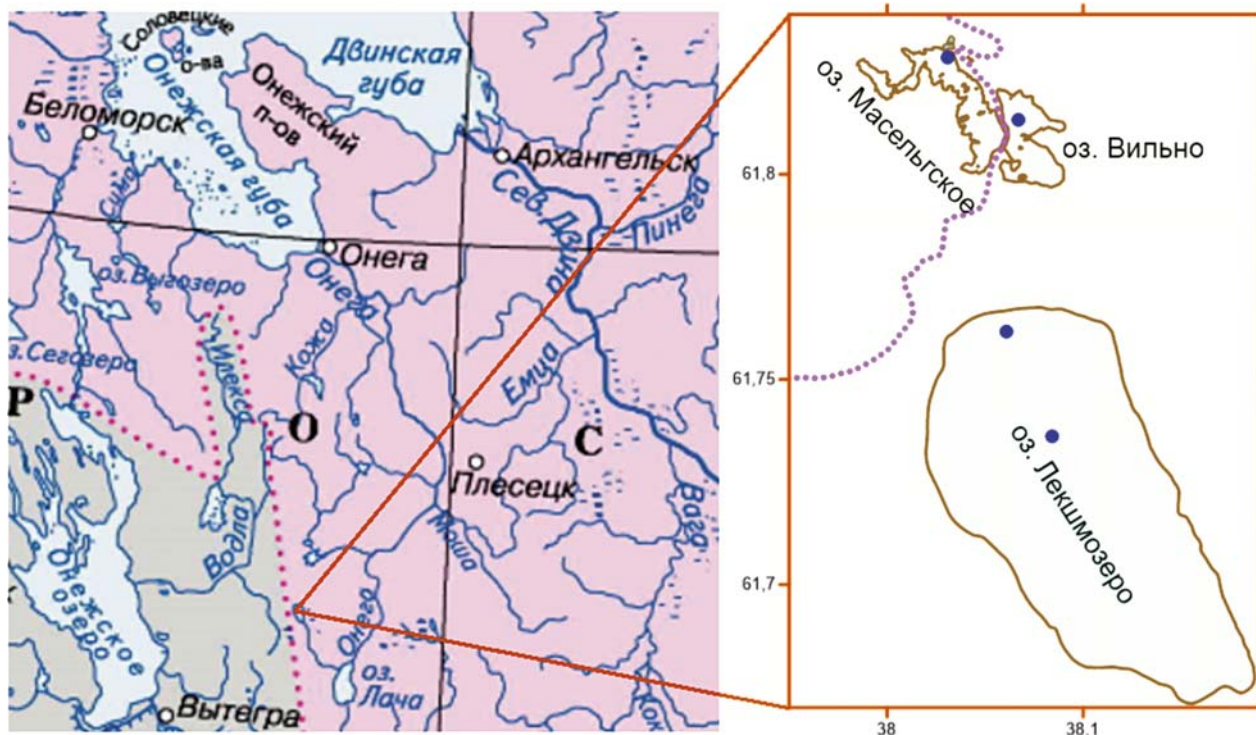


Рис. 1. Карта-схема района исследований и расположение станций

Fig. 1. Schematic map of the research area and the location of the stations

Таблица 1. Морфометрические характеристики исследованных озер

Table 1. Morphometric characteristics of the studied lakes

Характеристики Characteristics	Озера Lakes		
	Лекшмозеро Lyokshmozero	Вильно Vilno	Масельгское Maselgskoe
Координаты Coordinates	61°44'00"N 38°05'22"E	61°48'48"N 38°04'12"E	61°49'39"N 38°01'43"E
Высота над уровнем моря, м Altitude above sea level, m	156	167	166
Длина, км Length, km	12,5	3	6,5
Наибольшая ширина, км Maximum width, km	5,8	1,1	1
Средняя глубина, м Average depth, m	8	3,4	4,8
Наибольшая глубина, м Maximum depth, m	29	5,9	20,2
Площадь зеркала озера, км ² Lake mirror area, km ²	53,5	2,78	3,44
Объем озера, км ³ Volume of the lake, km ³	0,426	0,00947	0,0164
Удельный водосбор Specific catchment area	2,96	3,5	4,36
Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²	158,5	9,7	15,0
Среднегодовой сток с водосбора, км ³ Average annual runoff from the catchment area, km ³	0,0464	0,00285	0,0044
Коэффициент условного водообмена, год ⁻¹ Coefficient of conditional water exchange, year ⁻¹	0,11	0,29	0,28
Период условного водообмена, год Conditional water exchange period, year	9,2	3,5	3,6

Исследованные водоемы ледникового (озеро Вильно) и ледниково-тектонического (Лекшмозеро и Масельгское) происхождения. По показателю удельного водосбора водные объекты относятся к группе водоемов с малым удельным водосбором (< 10) [Григорьев, 1959], по показателю условного водообмена – к группе озер с малой величиной водообмена (< 0,5). Озера Вильно и Масельгское по величине площади водной поверхности относятся к группе малых, Лекшмозеро – к группе средних озер [Иванов, 1948].

Исследования на озерах Вильно, Лекшмозеро и Масельгское проводились в подледный период с 3 по 5 марта в 2014 году, с 16 по 20 марта в 2015 году и с 15 по 17 марта в 2016 году.

Отбор проб зоопланктона выполняли батометром Ван-Дорна (объем 6 л) с последующим процеживанием через планктонную сеть Джели (диаметр входного отверстия 18 см, размер ячеек 74 мкм). С каждого горизонта отбирали по 3 батометра. На озерах Масельгское и Лекшмозеро

отбор производился на глубоководных станциях по горизонтам с интервалом 3–4 м от поверхности до дна. Дополнительно на Лекшмозере производился отбор проб на прибрежной станции (9 м) с горизонтов 3 и 6 м. На озере Вильно зоопланктон отбирали с горизонтов 3 и 5 м. Также на станциях планктонной сетью облавливали весь слой от дна до поверхности. Всего собрано и обработано 52 пробы зоопланктона.

Обработка проб производилась в лаборатории стандартными гидробиологическими методами [Методические..., 1982]. При анализе проб определяли видовой состав, выделяли доминантные комплексы, подсчитывали численность (экз./м³) и биомассу (г/м³) организмов. Гидробионтов с относительной численностью > 5 % считали структурообразующими видами. Для определения таксономического состава зоопланктона использовали определитель [Определитель..., 2010]. Сырую биомассу зоопланктона рассчитывали по таблицам стандартных весов [Кононова, Фефилова, 2018].

Измерения температуры воды, pH, удельной электропроводности и содержания растворенного в воде кислорода на станциях выполняли с помощью многопараметрического зонда для определения качества вод Hydrolab MS5 (фирма Hach Environmental, США).

Кислородный и температурный режим в исследованных водоемах

Термический режим озер в зимний период в значительной мере определяется как условиями предзимнего охлаждения, так и морфометрическими особенностями водоема. Как правило, на больших по размеру водоемах ледообразование происходит позже и они теряют больше тепла. При выхолаживании вод осенью по достижении температуры максимальной плотности воды (около 4 °С) конвективное перемешивание доходит до дна и прекращается, выхолаживание вод продолжается, при этом основную роль играет ветровое перемешивание и достигает максимальных значений содержание растворенного кислорода [Пальшин и др., 2006].

В качестве оценки длительности периода ветрового перемешивания охлаждающихся вод перед ледоставом, определяющей термические и кислородные условия в озерах в зимний период, принималась разность между датами устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 4 и 0 °С. Датой устойчивого перехода температуры воздуха через

заданную градацию принимался тот день, после которого совсем не было обратного перехода, а если он был, то сумма его отрицательных отклонений превышала сумму положительных [Педь, 1951]. Даты устойчивого перехода через градации определялись по метеорологическим данным метеостанции Каргополь [Данные...] и представлены в табл. 2.

Ранние сроки образования льда на водоемах в октябре 2014 года способствовали сохранению более высокого теплозапаса водных масс, что в значительной степени определило температурные условия в водоемах. Наименьшие температуры воды и высокое содержание растворенного кислорода в озерах, как видно на рис. 2 и в табл. 3, наблюдались в марте 2014 г. после поздней и затяжной осени 2013 г. Максимальное теплосодержание вод в озерах Лекшозеро и Вильно и минимальное содержание кислорода во всех озерах были в марте 2015 г. с предшествующей ранней и короткой осенью. В оз. Масельское наибольшие температуры отмечались в 2016 г. – вероятно, это связано с относительной закрытостью водоема от северо-западных ветров, преобладавших осенью.

Содержание кислорода в водоемах уменьшалось ко дну. В 2014 и 2015 гг. в озерах Лекшозеро и Масельское сформировалась анаэробная зона с глубин соответственно 22 и 21 м, 15 и 14 м, как видно на рис. 2. В озере Вильно кислород исчезал только у самого дна. В 2016 г. анаэробные зоны отсутствовали во всех озерах.

Таблица 2. Даты устойчивого перехода температуры воздуха через принятые градации по данным метеостанции Каргополь

Table 2. Dates of the steady transition of air temperature through the accepted gradations according to the Kargopol weather station

Сезон Season	Осень Autumn		
	Дата Date		Период, сут. Period, day
Характеристики Characteristics			
Градации Gradation	4 °С	0 °С	4–0 °С
2009	29.09	29.10	30
2010	11.10	17.11	37
2011	13.10	4.11	22
2012	21.10	26.11	39
2013	14.10	25.11	42
2014	4.10	14.10	10
2015	6.10	6.11	31
2016	6.10	24.10	18

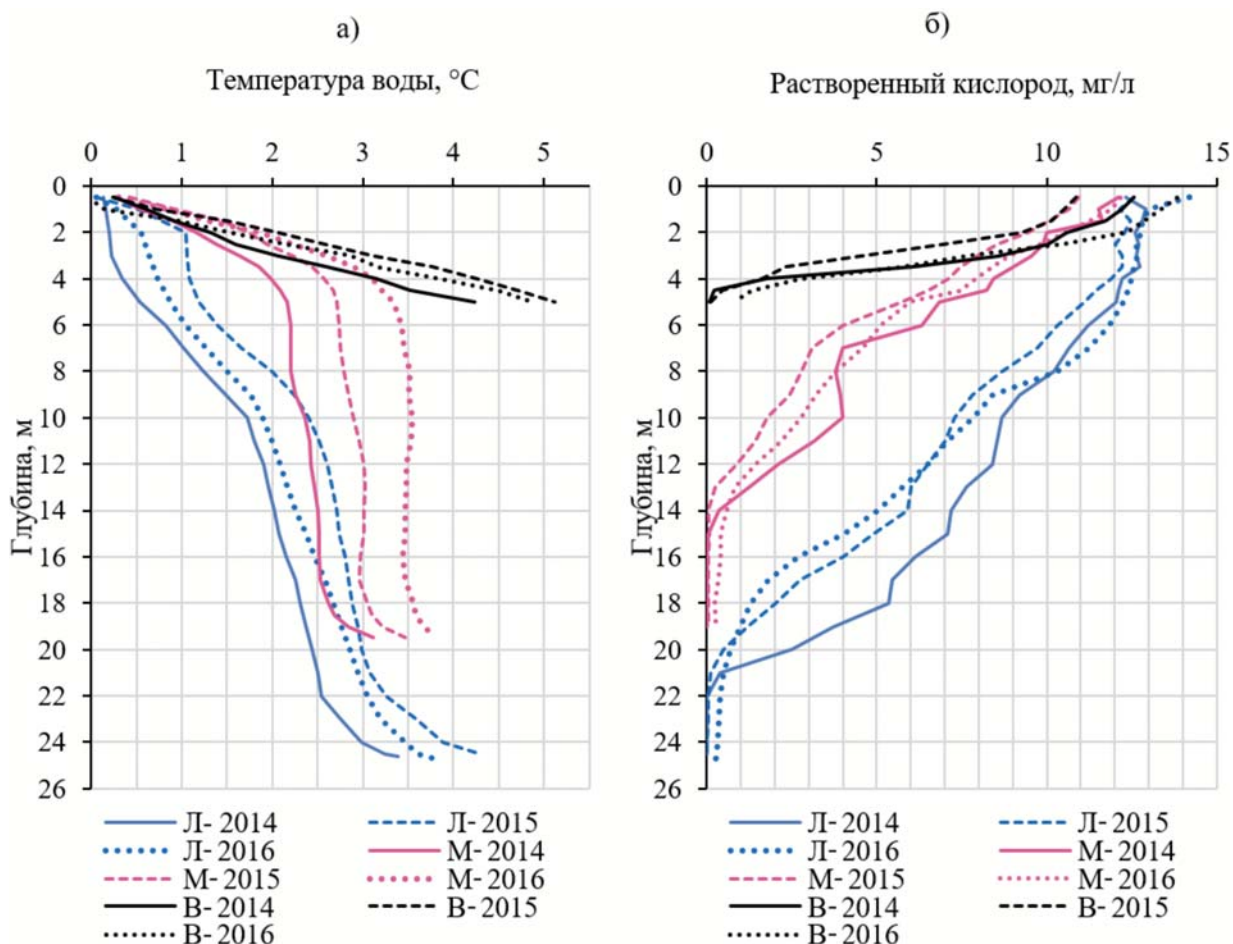


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воды (а) и растворенного в ней кислорода (б) в озерах в марте 2014–2016 гг.:

Л – Лекшмозеро, М – Масельгское, В – Вильно

Fig. 2. Vertical distribution of water temperature (a) and dissolved oxygen (б) in lakes in March 2014–2016:

Л – Lyokshmozero, М – Maselgskoe, В – Vilno

Таблица 3. Средневзвешенные значения температуры воды и содержания растворенного кислорода, температура у дна на озерах в марте 2014–2016 гг.

Table 3. Weighted average values of water temperature and dissolved oxygen content, the temperature of the water at the bottom in lakes in March 2014–2016

Озеро Lake	Год Year	T_w , °C Water temperature, °C	$T_{w \text{ дно}}$, °C Temperature of the water at the bottom, °C	O_2 , мг/л Dissolved oxygen, mg/l
Лекшмозеро Lyokshmozero	2014	1,66	3,39	7,28
	2015	2,34	4,30	6,03
	2016	1,98	3,89	6,27
Масельгское Maselgskoe	2014	2,19	3,14	4,12
	2015	2,70	3,47	3,13
	2016	3,19	3,81	3,87
Вильно Vilno	2014	2,00	4,37	7,50
	2015	2,82	5,48	5,69
	2016	2,39	5,00	8,21

Результаты и обсуждение

Характеристика зоопланктонных сообществ

Несмотря на суровые условия, сложившиеся в водоемах в подледный период, зоопланктонные сообщества продолжали активно развиваться. Зооценозы представлены зимними и круглогодичными формами ракообразных и коловраток.

В зимних сообществах озера Вильно обнаружено 14 видов зоопланктона, из них коловраток – 8 видов, ветвистоусых ракообразных – 3 и веслоногих ракообразных – 3; в Лекшмозере обнаружено 19 видов, из них коловраток – 10 видов, ветвистоусых ракообразных – 4 и веслоногих ракообразных – 5; в озере Масельгское – 17 видов, из них коловраток – 8 видов, ветвистоусых ракообразных – 3 и веслоногих ракообразных – 4. Зоопланктонные сообщества носили ярко выраженный ротаторно-копеподный характер. Коловратки в сообществах представлены наибольшим количеством видов.

Структурообразующий комплекс исследуемых зооценозов представлен 4–7 видами. Наиболее часто в сообществах озер встречались *Eudiatomus gracilis* Sars, 1863, *E. graciloides* Lilljeborg, 1888, *Cyclops kolensis* Lilljeborg, 1901, *Daphnia cristata* Sars, 1861, *Kellicottia longispina* Kellicott, 1879, *Keratella cochlearis* Gosse, 1851, *K. quadrata* Müller, 1786, *Filinia longiseta* Ehrenberg, 1834, *F. terminalis* Plate, 1886.

Кроме того, в зооценозах отмечены копеподы *C. strenuus* Fischer, 1851, *C. abyssorum* Sars, 1863, *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863, *Heterocope appendiculata* Sars, 1863, а также копеподитные стадии *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857). Из ветвистоусых ракообразных в зооценозах встречались *D. longispina* O. F. Müller, 1785, *D. longiremis* G. O. Sars, 1862, *Bosmina longirostris* O. F. Müller, 1785, а также единичные экземпляры представителей рода *Chydorus*. Из коловраток в сообществах отмечены *Notholca labis* Gosse, 1887, *Polyarthra dolichoptera* Idelson, 1925, *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850.

В зависимости от года исследований в водоемах по численности доминировали копеподы (озера Вильно и Масельгское) и коловратки (Лекшмозеро), по биомассе – копеподы. В Лекшмозере копеподы были многочисленны только в 2014 году, в 2015 и 2016 годах по численности преобладали коловратки.

Вклад коловраток в общую численность зоопланктона в озерах составил от 5 до 69 % в зависимости от года исследований, копепод – от

21 до 82 %. Коловратки в зооценозах были малочисленны, их доля в общей численности зоопланктона составляла около 17 %. В Лекшмозере в 2015 году ветвистоусые ракообразные в пробах не обнаружены.

В подледный период зоопланктон активно развивался, в сообществах наблюдались яйценосные самки копепод и коловраток, а также науплиусы копепод. В зависимости от года исследований вклад науплиальных стадий в общую численность зоопланктона в Лекшмозере составлял от 20 до 24 %, в Вильно – от 9 до 12 % и в оз. Масельгское – от 8 до 55 %. Следует отметить, что в марте 2016 года в озерах Вильно и Лекшмозеро науплиальные стадии отсутствовали.

Наиболее высокие значения численности зоопланктона зафиксированы в 2014 и 2015 годах, что связано с интенсивным размножением веслоногих ракообразных. В 2014 году максимальная численность отмечена в озере Вильно и составляла 66,7 тыс. экз./м³, в 2015 году – в озере Масельгское (47,2 тыс. экз./м³). В 2016 году средние значения численности зоопланктона минимальны для всех озер. Средние значения биомассы зоопланктона в зимний период невелики, что связано с преобладанием в сообществах коловраток и науплиальных стадий копепод. Максимальные значения биомассы во все периоды исследований отмечены в озере Вильно (табл. 4).

На прибрежной станции (Лекшмозеро) в зависимости от года исследований численность зоопланктона варьировала от 11,7 до 19,5 тыс. экз./м³, а биомасса – от 0,07 до 0,14 г/м³. По численности и биомассе доминировали копеподы, исключение составил 2015 год, когда в сообществах преобладали коловратки (до 82 % от общей численности зоопланктона).

Вертикальное распределение зоопланктона в подледный период

В подледный период зоопланктон в водоемах распределялся неравномерно. Некоторые формы зоопланктона были многочисленны только у дна или поверхности. Большинство видов в озере Масельгское образовывали скопления в поверхностном (на глубине 1, 3 и 4 м) и придонном (14 м) горизонте, а в Лекшмозере – на глубинах 1, 3, 7 и 20 м.

В озере Вильно, где кислород исчезал только у дна, планктонные организмы образовывали скопления, как в верхнем (3 м), так и нижнем (5 м) горизонтах. В зависимости от года исследований картина вертикального распределения гидробионтов была неоднородной.

Таблица 4. Основные структурные показатели развития зимних сообществ зоопланктона озер Вильно, Лекшмозеро и Масельгское (2014–2016 гг.)

Table 4. The main structural indicators of the development of winter communities of zooplankton in Lakes Vilno, Lyokshmozero and Maselgskoe (2014–2016)

Показатель Indicator	Озера Lakes		
	Вильно Vilno	Лекшмозеро Lyokshmozero	Масельгское Maselgskoe
2014			
Численность, тыс. экз./м ³ Abundance, thous. ind./m ³	66,7	26,4	52
$N_{\text{clad}} : N_{\text{rot}} : N_{\text{cop}}, \%$ *	12:28:60	4:38:58	3:45:52
Биомасса, г/м ³ Biomass, g/m ³	0,45	0,2	0,16
$B_{\text{clad}} : B_{\text{rot}} : B_{\text{cop}}, \%$ **	9:1:90	5:18:77	8:23:69
Число видов Number of species	10	15	14
Доминирующие виды Dominant species	<i>E. gracilis</i> <i>D. cristata</i> <i>K. longispina</i> <i>K. cochlearis</i>	<i>E. graciloides</i> <i>C. kolensis</i> <i>K. longispina</i> <i>K. cochlearis</i>	<i>E. gracilis</i> <i>C. kolensis</i> <i>K. longispina</i> <i>K. quadrata</i> <i>F. longiseta</i>
2015			
Численность, тыс. экз./м ³ Abundance, thous. ind./m ³	34,2	18,8	47,2
$N_{\text{clad}} : N_{\text{rot}} : N_{\text{cop}}, \%$	2:45:53	0:54:46	1:30:69
Биомасса, г/м ³ Biomass, g/m ³	0,4	0,08	0,08
$B_{\text{clad}} : B_{\text{rot}} : B_{\text{cop}}, \%$ *	11:1:82	0:35:65	1:7:92
Число видов Number of species	9	10	12
Доминирующие виды Dominant species	<i>E. gracilis</i> <i>N. labis</i> <i>K. longispina</i> <i>K. quadrata</i> <i>F. terminalis</i>	<i>E. graciloides</i> <i>C. kolensis</i> <i>K. longispina</i> <i>K. cochlearis</i>	<i>E. gracilis</i> <i>C. kolensis</i> <i>D. cristata</i> <i>K. longispina</i> <i>K. cochlearis</i> <i>K. quadrata</i> <i>F. longiseta</i>
2016			
Численность, тыс. экз./м ³ Abundance, thous. ind./m ³	8,4	12,7	8,5
$N_{\text{clad}} : N_{\text{rot}} : N_{\text{cop}}, \%$	13:5:82	10:69:21	17:10:73
Биомасса, г/м ³ Biomass, g/m ³	0,12	0,17	0,1
$B_{\text{clad}} : B_{\text{rot}} : B_{\text{cop}}, \%$	4:1:95	16:35:49	9:1:90
Число видов Number of species	5	8	6
Доминирующие виды Dominant species	<i>E. gracilis</i> <i>C. strenuus</i> <i>D. cristata</i> <i>K. longispina</i>	<i>E. graciloides</i> <i>C. kolensis</i> <i>D. cristata</i> <i>K. longispina</i>	<i>E. gracilis</i> <i>C. kolensis</i> <i>D. cristata</i> <i>K. longispina</i>

Примечание. * $N_{\text{clad}} : N_{\text{rot}} : N_{\text{cop}}$ – процентное соотношение основных групп Cladocera, Rotifera и Copepoda по численности; ** $B_{\text{clad}} : B_{\text{rot}} : B_{\text{cop}}$ – процентное соотношение основных групп Cladocera, Rotifera и Copepoda по биомассе.

Note. * $N_{\text{clad}} : N_{\text{rot}} : N_{\text{cop}}$ – percentage of the major groups Cladocera, Rotifera and Copepoda by abundance; ** $B_{\text{clad}} : B_{\text{rot}} : B_{\text{cop}}$ – percentage of the major groups Cladocera, Rotifera and Copepoda by biomass.

Численность зоопланктона в 2014 и 2015 году убывала с глубиной, резких колебаний значений биомассы по вертикали в исследуемые периоды не выявлено. На глубине 3 м численность зоопланктона была максимальной и составляла в 2014 году 84 тыс. экз./м³, в 2015 году – 49 тыс. экз./м³. В 2016 году наблюдалось равномерное распределение зоопланктона, его количественные показатели по горизонтам существенно не различались (3 м – 8,8 тыс. экз./м³ и 0,11 г/м³; 5 м – 8 тыс. экз./м³ и 0,13 г/м³ соответственно).

Максимальная численность коловраток в 2014 и 2015 году зафиксирована на глубине 5 м. Коловратки *K. longispina* и *K. cochlearis* распределялись равномерно по всей толще, *K. quadrata* и *F. terminalis* образовывали скопления в нижних слоях (5 м), за исключением 2015 года, когда они были многочисленны в слое 3 м, что может быть связано с вегетацией фитопланктона подо льдом (отсутствие снега на поверхности льда), а также повышенными значениями температуры воды у дна (быстрое наступление ледостава). В 2016 году коловратки отмечены только на горизонте 3 м (рис. 3). В 2016 году сообщество коловраток в озере было представлено только *K. longispina*.

Наибольшая численность ракообразных в озере Вильно зафиксирована в 2014 и 2015 годах на горизонте 3 м. *E. gracilis*, *D. cristata*, а также науплиусы копипод в эти годы наблюдений были многочисленны в слое 3 м.

В 2016 году веслоногие и ветвистоусые ракообразные распределялись равномерно, науплии в этот период в сообществах отсутствовали. Представители р. *Cyclops* были многочисленны на глубине 5 м, за исключением 2015 года.

В озерах Лекшозеро и Масельское в вертикальном столбе воды в подледный период гидробионты распределялись неравномерно. В Лекшозере максимальные значения численности (56,7 и 71,4 тыс. экз./м³) и биомассы (0,56 и 1,0 г/м³) зоопланктона отмечены в 2014 и 2016 годах в придонных слоях (20 м). Исключение составил март 2015 года, когда наибольшая численность зоопланктона зафиксирована на глубине 1 и 3 м (23,4 тыс. экз./м³), а биомасса – на глубине 7 м (0,1 г/м³).

В подледный период в пелагиали Лекшозера Rotifera встречались на всех горизонтах. Наибольшая численность коловраток в марте 2014 года отмечена на глубине 20 м (рис. 4), где образовывали скопления коловратки *K. longispina* и *K. quadrata*. Также эти виды были многочисленны на глубине 3 и 7 м. На границе аэробной и анаэробной зоны (20 м) преобладали коловратки *K. cochlearis* и *F. terminalis*. Максимальная численность аспланхны отмечена на глубине 7 м. В 2015 и 2016 году большинство коловраток (*K. longispina* и *K. quadrata*) обитали в поверхностном горизонте (1 м), за исключением представителей рода *Filinia*, образующих скопления в гипolimнионе в течение всех периодов исследования.

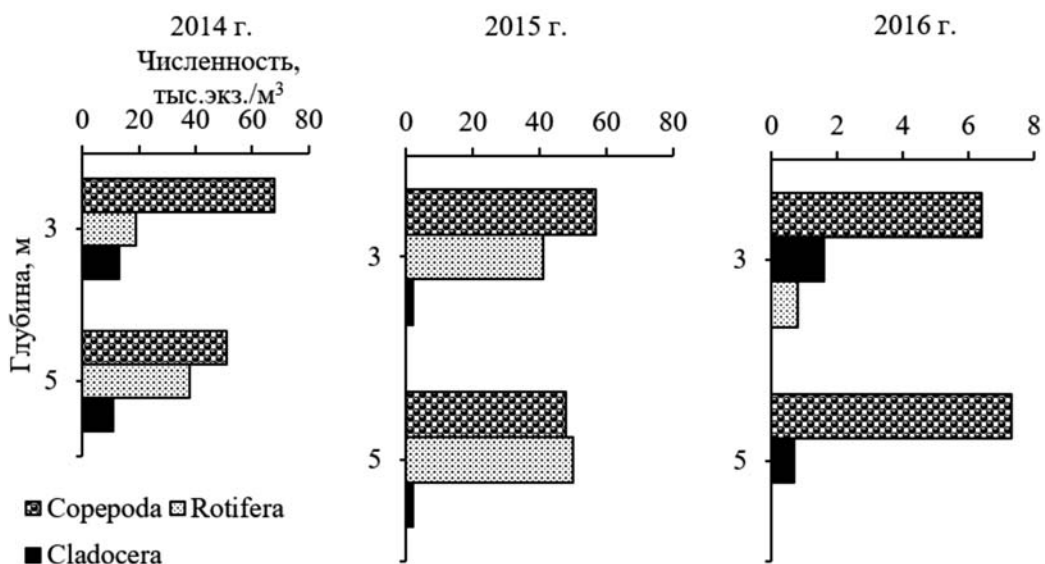


Рис. 3. Вертикальное распределение численности зоопланктона в озере Вильно в подледный период 2014–2016 гг.

Fig. 3. Vertical distribution of zooplankton abundance in Lake Vilno in the under-ice period of 2014–2016

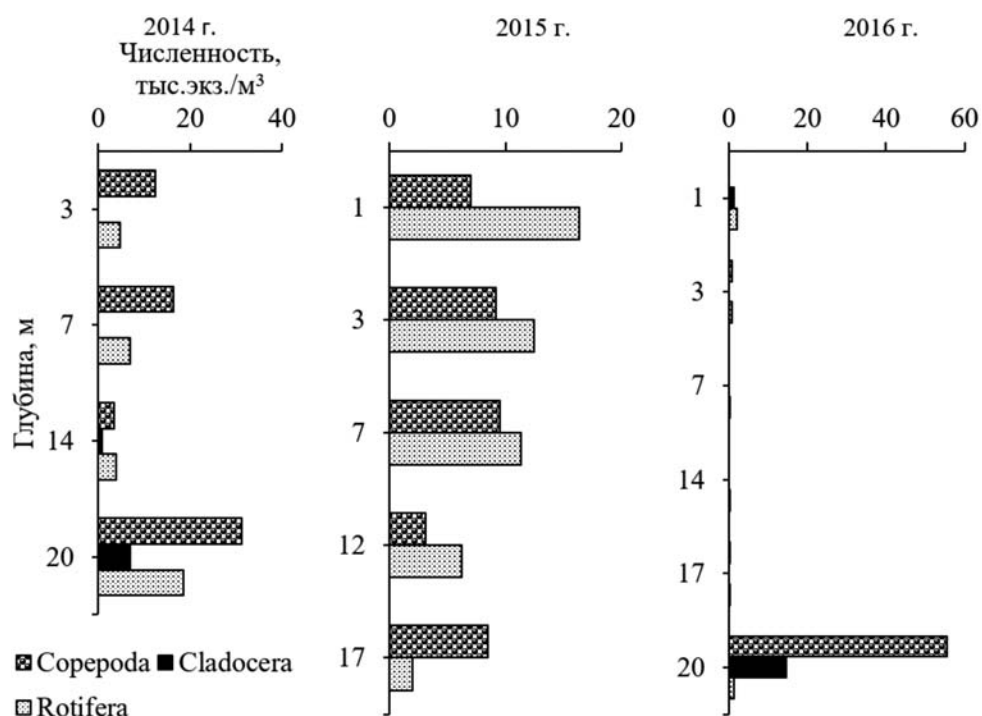


Рис. 4. Вертикальное распределение численности зоопланктона в озере Лекшмозере в подледный период 2014–2016 гг.

Fig. 4. Vertical distribution of zooplankton abundance in Lake Lyokshmozero in the under-ice period of 2014–2016

Картина распределения веслоногих и ветвистоусых ракообразных в Лекшмозере в 2014 и 2016 году была сходной, что, по-видимому, связано с длительностью осенней конвекции в водоеме в указанные периоды (табл. 2). В эти годы максимальные численность и биомасса ракообразных отмечены на глубине 20 м. Здесь были многочисленны виды *E. graciloides*, *C. kolensis*, *D. cristata*. Науплиальные стадии копепоид приурочены к поверхностному горизонту (3 м). В марте 2016 года зафиксировано смещение сроков размножения зоопланктона, в пробах отмечены яйценосные самки копепоид, науплии отсутствовали. В 2015 году наибольшая численность веслоногих ракообразных зафиксирована на глубине 3 и 7 м, ветвистоусые ракообразные в этот период в пробах не отмечены (рис. 4). Зоопланктон на прибрежной станции распределялся, что связано с благоприятными кислородными условиями в прибрежной зоне.

Неоднородность распределения зоопланктона отмечена и в пелагиали озера Масельгское. Наибольшие значения численности и биомассы зоопланктона в озере в 2014 году отмечены в поверхностном горизонте на глубине 4 м – 96,0 тыс. экз./м³ и 0,21 г/м³, а также в придонном горизонте на глубине 14 м –

87,3 тыс. экз./м³ и 0,28 г/м³ соответственно. В 2015 году максимальная численность отмечалась на глубине 3 м и составляла 66,6 тыс. экз./м³, а биомасса – 0,17 г/м³. В 2016 году максимальные численность и биомасса зафиксированы на глубине 14 м – 11,3 тыс. экз./м³ и 0,11 г/м³ и 1 м – 9,3 тыс. экз./м³ и 0,13 г/м³ соответственно.

В озере Масельгское распределение коловраток по вертикали различалось по годам (рис. 5). В 2014 году коловратки были многочисленны на всех горизонтах, но максимальная их численность отмечалась на границе анаэробной и аэробной зоны (14 м). Здесь образовывали скопления коловратки *K. longispina* и *K. cochlearis*, *P. dolichoptera*, *K. quadrata* и *F. longiseta*. В 2015 году численность коловраток с глубиной снижалась. Наибольшая их численность отмечена на глубине 1 м, где доминировала *K. longispina*. Коловратка *K. cochlearis* распределялась равномерно по всему водному столбу до анаэробной зоны (14 м). В марте 2016 года Rotifera были малочисленными. В сообществе отмечены лишь два вида – *K. longispina* и *K. quadrata*. Келликоттия распределялась равномерно по всему водному столбу, керателла образовывала скопления в гипolimнионе на глубине 14 м.

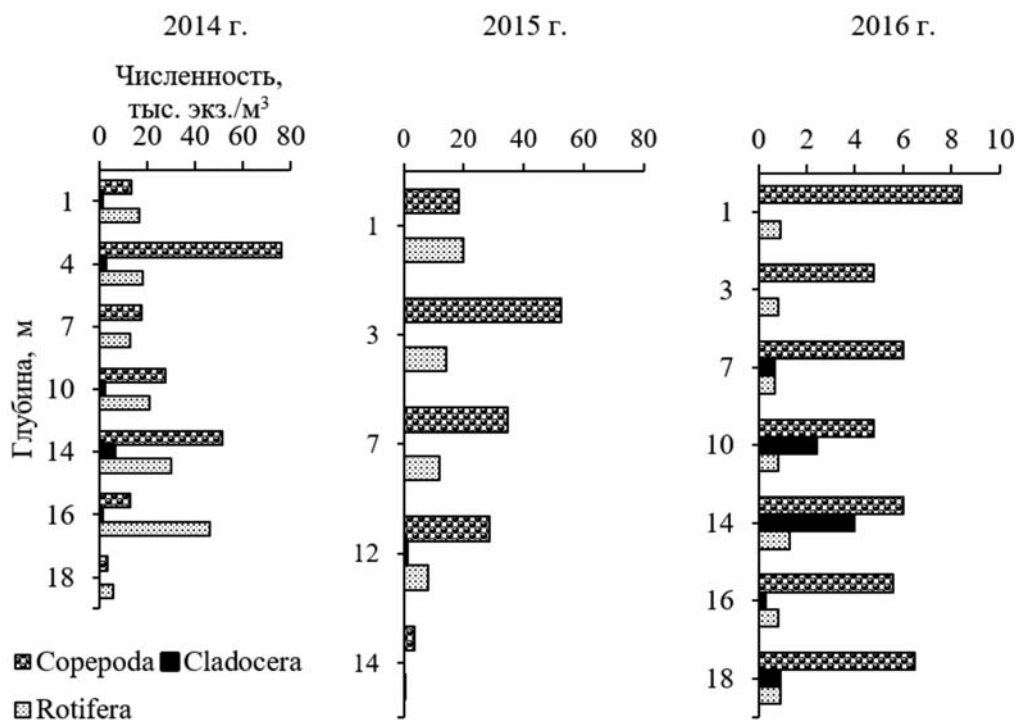


Рис. 5. Вертикальное распределение численности зоопланктона в озере Масельгское в подледный период 2014–2016 гг.

Fig. 5. Vertical distribution of zooplankton abundance in Lake Maselgskoe in the under-ice period of 2014–2016

Веслоногие ракообразные образовывали как поверхностные, так и придонные скопления. Максимальная численность *E. gracilis* в 2014 и 2016 году отмечена на глубине 7 м, в 2015 году – на границе аэробной и анаэробной зоны (12 м). В 2014 и 2015 годах на границе аэробной и анаэробной зоны (14 и 12 м) многочисленны и представители р. *Cyclops*, в 2016 году они образовывали скопления сразу подо льдом (1 м) и у дна (18 м). Науплиусы были обильны в поверхностном горизонте (1–7 м), но в 2016 году для них характерно равномерное распределение по водному столбу. Дафнии во все периоды исследований были многочисленны в придонном горизонте (12–18 м).

Распределение некоторых видов зоопланктона в озерах Масельгское и Лекшмозеро сходное, что может быть связано с наиболее близкими значениями температуры воды по водному столбу в этих озерах. Наиболее четко сходство распределения гидробионтов в этих водоемах подо льдом прослеживалось в 2015 году.

Наши исследования показали, что основными факторами, лимитирующими развитие и распределение зоопланктона в исследованных водоемах в подледный период, являлись длительность периода осенней конвекции и сроки

образования льда, температурный и кислородный режим, а также наличие пищи.

Важным фактором, регулирующим развитие и распределение зимних сообществ, являются ледовые процессы. Ранние сроки образования льда на водоемах в осенний период способствуют сохранению более высокого теплозапаса водных масс, что в значительной степени определяет температурные и кислородные условия в водоемах, влияющие на активность микробного и зоопланктонного сообществ. Так, короткий период осеннего выхолаживания в 2014 году (10 дней) и раннее ледообразование привели к повышению температуры в придонном горизонте и ухудшению кислородного режима в озерах зимой 2015 года. Температура воды у дна в озерах была выше, чем в другие годы. Повышение температуры воды вызвало смещение анаэробной зоны в озере Масельгское до глубины 14 м и в Лекшмозере до 21 м. Вертикальное распределение зоопланктона изменялось, следуя в основном изменению температуры и содержания растворенного кислорода в воде.

При длительном периоде осенней конвекции происходит выхолаживание толщи воды и грунтов, что также может повлиять на развитие и функционирование планктонных организмов и бактериопланктона. Например, длительный

период осеннего перемешивания вод в 2015 году мог повлиять на функционирование сообществ зимой 2016 года. В марте 2016 года численность зоопланктона в водоемах была невелика, зоопланктон развивался слабо. В озерах Вильно и Лекшмозера науплиальные стадии не были обнаружены, а доля науплиусов в озере Масельгское составляла от 6 до 10 % от общей численности зоопланктона. В озере Масельгское большинство видов не образовывали скопления подо льдом, а распределялись равномерно.

В подледный период зоопланктон в озерах сосредоточен в основном в двух противоположных горизонтах водной толщи – подледном и придонном. Поверхностные скопления зоопланктона в водоемах могут быть связаны с пищевыми условиями – с развитием фитопланктона у кромки льда, а также со скоплением бактерий подо льдом, а придонные – с концентрацией пищевых объектов в нижних слоях водоемов [Ривьер, 1988].

Заключение

В подледный период 2014–2016 гг. зоопланктон характеризовался скудностью видового состава. Зооценозы были представлены зимними и круглогодичными формами ракообразных и коловраток. В зимних сообществах озера Вильно обнаружено 14 видов зоопланктона, Лекшмозера – 19 видов, озера Масельгское – 18 видов. Коловратки определяли видовое разнообразие сообществ.

Несмотря на активное развитие отдельных групп зоопланктона подо льдом, количественные характеристики гидробионтов в зимний период невелики. Основу численности и биомассы зоопланктона в сообществах составляли copepody и их науплиальные стадии.

Анализ вертикального распределения зоопланктона выявил неоднородность распределения гидробионтов подо льдом. Большинство видов зоопланктона образуют скопления в поверхностном и придонном горизонтах, некоторые виды – только в придонном.

Уровень развития и распределение зоопланктона в подледный период связаны с особенностями температурного и кислородного режима, с длительностью периода осенней конвекции, а также с пищевыми ресурсами в озерах.

Литература

Балушкина Е. В., Голубков С. М., Иванова М. Б., Никулина В. Н., Умнов А. А., Умнова Л. П. Опыт

прогнозирования последствий эвтрофирования Лекшмозера на основе закономерностей функционирования экосистем // Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий. СПб.: ЗИН РАН, 1997. С. 228–265.

Баянов Н. Г. Видовой состав, структура и уровень развития зимних зоопланктонных сообществ озер Пинежского заповедника // Экологическое состояние континентальных водоемов Арктической зоны в связи с промышленным освоением северных территорий: Тезисы докл. Междунар. науч. конф. (Архангельск, 21–25 июня 2005 г.). Архангельск, 2005. С. 10.

Григорьев С. В. Каталог озер Карелии. М.-Л.: АН СССР, 1959. 239 с.

Данные архива погоды. Каргополь // Погода и климат [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 11.04.2024).

Ермолаева Н. И. Состав и функционирование зимних зоопланктонных сообществ Новосибирского водохранилища // Сибирский экологический журнал. 2000. № 2. С. 165–171.

Жданова С. М., Малин М. И. Особенности подледного зоопланктона озера Плещеево (Ярославская обл., Россия) // Трансформация экосистем. 2023. № 6(3). С. 39–52. doi: 10.23859/estr-220624

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

Кононова О. Н., Фефилова Е. Б. Методическое руководство по определению размерно-весовых характеристик организмов зоопланктона Европейского Севера России. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2018. 151 с.

Кузнецова М. А., Баянов Н. Г. Зоопланктоценозы высокоминерализованных карстовых озер Пинежского заповедника (Архангельская область) // Вестник Нижегородского университета. 1999. № 1. С. 29–38.

Лазарева В. И., Соколова Е. А. Состав и обилие зимнего зоопланктона в Рыбинском водохранилище // Поволжский экологический журнал. 2017. № 2. С. 136–146.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Ред. Г. Г. Винберг, Г. М. Лаврентьева. Л.: ГосНИОРХ, 1982. 33 с.

Национальные парки России / Ред. И. В. Чебакова. М.: ЦОДП, 1996. 197 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1: Зоопланктон / Ред. В. Р. Алексеев, С. Я. Цалолихин. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 494 с.

Пальшин Н. И., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Митрохов А. В., Петров М. П., Тержевик А. Ю. Гидрофизические аспекты развития экосистемных процессов замерзающих озер // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований: Мат-лы юбилейной конф., посв. 15-летию ИВПС (Петрозаводск, 19–20 сент. 2006 г.). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. С. 359–377.

Педь Д. А. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // Метеорология и гидрология. 1951. № 10. С. 38–39.

Речкалов В. В. Состав и особенности функционирования зимних сообществ зоопланктона озер различной минерализации: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тюмень, 2000. 24 с.

Ривьер И. К. Зимний зоопланктон Рыбинского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод. Борок: АН СССР, 1982. Т. 43/46. С. 191–210.

Ривьер И. К. Состав и экология зимних зоопланктонных сообществ. Л.: Наука, 1986. 160 с.

Ривьер И. К. Особенности функционирования зоопланктонных сообществ водоемов различных типов / Ред. А. В. Монаков. Л.: Наука, 1988. С. 80–111.

Ривьер И. К. Холодноводный зоопланктон озер бассейна Верхней Волги / Ред. В. Н. Яковлев. Ижевск: Пермьяков С. А., 2012. 390 с.

Салахутдинов А. Н. Зоопланктон некоторых озер Среднего Поволжья в зимний период / Ред. Ю. Е. Егоров. Казань: Казан. фил. АН СССР, 1985. Ч. 1. С. 90–101.

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Зоопланктон Петрозаводской губы Онежского озера в подледный период // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2017. № 6(167). С. 90–95.

Тимакова Т. М., Калинин Н. М., Лозовик П. А. Состояние экосистемы оз. Лекшмозеро (Архангельская обл., Российская Федерация) после массовой гибели рыбы // Гидробиологический журнал. 2006. Т. 42, № 6. С. 93–96.

Щербаков А. П. Озеро Глубокое. М.: Наука, 1967. 379 с.

References

Alekseev V. R., Tsalolikhin S. Ya. (ed.). A key to zooplankton and zoobenthos of the freshwater bodies in the European part of Russia. Vol. 1. Zooplankton. Moscow: KMK; 2010. 494 p. (In Russ.)

Balushkina E. V., Golubkov S. M., Ivanova M. B., Nikulina V. N., Umnov A. A., Umnova L. P. Experience of forecasting the consequences of eutrophication of Lake Lekshmozero based on the patterns of ecosystem functioning. *Reaktsiya ozernykh ekosistem na izmenenie bioticheskikh i abioticheskikh uslovii = Response of lake ecosystems to changes in biotic and abiotic conditions*. St. Petersburg: ZIN RAN; 1997. P. 228–265. (In Russ.)

Bayanov N. G. Species composition, structure and level of development of winter zooplankton communities of lakes of the Pinezhsky Reserve. *Ekologicheskoe sostoyanie kontinental'nykh vodoemov Arkticheskoi zony v svyazi s promyshlennym osvoeniem severnykh territorii: Tezisy dokl. Mezhdunar. konf. (Arkhangel'sk, 21–25 iyunya, 2005 g.) = The ecological state of the continental reservoirs of the Arctic zone in connection with the industrial development of the northern territories: Proceed. int. conf. (Arkhangelsk, June 21–25, 2005)*. Arkhangel'sk; 2005. 10 p. (In Russ.)

Chebakova I. V. (ed.). National parks of Russia. Moscow: TsODP; 1996. 197 p. (In Russ.)

Data of the weather archive. Kargopol. *Pogoda i klimat = Weather and Climate*. (In Russ.). URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (accessed: 11.04.2024).

Ermolaeva N. I. Composition and functioning of winter zooplankton communities of the Novosibirsk reservoir. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2000;2:165–171. (In Russ.)

Grigor'ev S. V. A catalogue of lakes in Karelia. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1959. 239 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.)

Kononova O. N., Fefilova E. B. Methodological guide for determining the size and weight characteristics of zooplankton organisms of the European North of Russia. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN; 2018. 151 p. (In Russ.)

Kuznetsova M. A., Bayanov N. G. Zooplanktonocenoses of highly mineralized karst lakes of the Pinezhsky Reserve (Arkhangelsk Region). *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 1999;1:29–38. (In Russ.)

Lazareva V. I., Sokolova E. A. Composition and abundance of winter zooplankton in the Rybinsk reservoir. *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal = Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2017;2:136–146. (In Russ.)

Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Petrov M. P., Terzhevik A. Yu. Hydrophysical aspects of the development of ecosystem processes in freezing lakes. *Vodnye resursy Evropeiskogo Severa Rossii: itogi i perspektivy issledovaniy: Materialy yubileinoi konf., posv. 15-letiyu IVPS (Petrozavodsk, 19–20 sent. 2006 g.) = Water resources of the European North of Russia: results and perspectives. Proceed. conf. dedicated to the 15th anniversary of NWPI (Petrozavodsk, Sept. 19–20, 2006)*. Petrozavodsk; 2006. P. 359–377. (In Russ.)

Ped' D. A. On determining the dates of steady transition of air temperature through certain values. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1951;10:38–39. (In Russ.)

Rechkalov V. V. Composition and features of functioning of winter zooplankton communities in lakes of various mineralization: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Tyumen'; 2000. 24 p. (In Russ.)

Riv'er I. K. Winter zooplankton of the Rybinsk reservoir. *Tr. In-ta biol. vnutr. vod = Transactions of Institute for Biology of Inland Waters*. Borok: AN SSSR; 1982. Vol. 43/46. P. 91–210. (In Russ.)

Riv'er I. K. Composition and ecology of winter zooplankton communities. Leningrad: Nauka; 1986. 160 p. (In Russ.)

Riv'er I. K. Features of the functioning of zooplankton communities in reservoirs of various types. Leningrad: Nauka; 1988. P. 80–111. (In Russ.)

Riv'er I. K. Cold-water zooplankton of lakes of the Upper Volga basin. Izhevsk: Publ. Permyakov S. A.; 2012. 390 p. (In Russ.)

Salakhutdinov A. H. Zooplankton of some lakes of the Middle Volga region in winter. Kazan': Kazanskii filial AN SSSR; 1985. Part 1. P. 90–101. (In Russ.)

Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. Zooplankton of the Petrozavodsk bay of Lake Onega in the ice age. *Uchenye*

zapiski Petrozavodskogo gos. universiteta = Proceed. of Petrozavodsk State University. 2017;6(167):90–95. (In Russ.)

Shcherbakov A. P. Lake Glubokoe. Moscow: Nauka; 1967. 379 p. (In Russ.)

*Timakova T. M., Kalinkina N. M., Lozovik P. A. The state of the ecosystem of Lake Lekshmozero (Arkhangelsk Region, Russian Federation) after mass death of fish. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Hydrobiological Journal. 2006;42(6):93–96. (In Russ.)**

Vinberg G. G., Lavrent'eva G. M. (eds.). Methodological recommendations for collecting and processing materials for hydrobiological studies in freshwater reservoirs. Zooplankton and its products. Leningrad: GosNIORH; 1982. 33 p. (In Russ.)

*Zhdanova S. M., Malin M. I. Features of the subglacial zooplankton of Lake Pleshcheevo (Yaroslavl Region, Russia). *Transformatsiya ekosistem = Transformation of Ecosystems. 2023;6(3):39–52. (In Russ.). doi: 10.23859/estr-220624**

*Поступила в редакцию / received: 14.05.2024; принята к публикации / accepted: 04.09.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Собко Елена Иосифовна

научный сотрудник

e-mail: elfisina@yandex.ru

Климов Сергей Иванович

научный сотрудник

e-mail: kliopa2@yandex.ru

Неверова Наталья Валерьевна

научный сотрудник

e-mail: nevnata@yandex.ru

Морева Ольга Юрьевна

научный сотрудник

e-mail: mapycr1@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Sobko, Elena

Researcher

Klimov, Sergey

Researcher

Neverova, Natalia

Researcher

Moreva, Olga

Researcher

УДК 504.7 : 556 : 556.04 (470.2)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПУЛОВ УГЛЕРОДА И ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ

Ю. Н. Лукина*, Н. А. Белкина, Н. М. Калинин, С. Р. Богданов, М. Б. Зобков, Р. Э. Здоровеннов, М. С. Потахин, Г. Э. Здоровеннова, А. В. Толстикова, Н. И. Пальшин, Г. С. Бородулина, М. С. Богданова, Н. А. Мясникова, С. И. Смирнов, Ю. С. Новикова, Е. В. Гатальская, И. В. Морозова, М. В. Зобкова, Ю. Л. Сластина, Е. М. Макарова, М. Т. Сярки, Д. С. Коновалов, Е. В. Теканова

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

Представлена информация о первом этапе исследований ВИП ГЗ «Ритм углерода» по оценке запасов и потоков углерода в водных экосистемах на территории интенсивного полигона первого типа в заповеднике «Кивач» (Карелия). Исследования проводятся в рамках программы мониторинга запасов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах (водоемы, водотоки) бореальной зоны Европейского Севера России. Осуществлен выбор модельных водных объектов (оз. Чудесная ламба, р. Сандалка, руч. Чечкин), сформирована сеть станций наблюдений. Изучена ландшафтная структура водосборной территории, дана характеристика гидрогеологических условий, определены глубины залегания и химический состав подземных вод. Определен химический состав воды озера, реки и ручья в разные сезоны (минерализация, газовый состав, рН, органическое вещество и биогенные элементы) и определены формы нахождения углерода в воде. Изучена литология и химический состав донных отложений. Оценены количественные показатели развития фито-, бактерио- и зоопланктона. Установлены метеостанция на берегу озера и автоматические станции в водной толще озера для измерения гидрофизических параметров (температура воды, потоки солнечной радиации, течения), необходимых для оценки коэффициента газопереноса и эмиссии парниковых газов. Разработаны авторские конструкции стационарных накопительных камер-ловушек для наблюдений за эмиссией газа из донных отложений. Получены первые экспериментальные данные о потоках парниковых газов из донных отложений в воду и на границе вода-атмосфера.

Ключевые слова: водные экосистемы; озера; биота; донные отложения; парниковые газы; баланс и эмиссия углерода; устойчивость водной толщи; мониторинг

Для цитирования: Лукина Ю. Н., Белкина Н. А., Калинин Н. М., Богданов С. Р., Зобков М. Б., Здоровеннов Р. Э., Потахин М. С., Здоровеннова Г. Э., Толстикова А. В.,

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

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН ВИП ГЗ «Ритм углерода» (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

Yu. N. Lukina*, N. A. Belkina, N. M. Kalinkina, S. R. Bogdanov, M. B. Zobkov, R. E. Zdorovenov, M. S. Potakhin, G. E. Zdorovenova, A. V. Tolstikov, N. I. Palshin, G. S. Borodulina, M. S. Bogdanova, N. A. Myasnikova, S. I. Smirnov, Iu. S. Novikova, E. V. Gatalskaya, I. V. Morozova, M. V. Zobkova, Yu. L. Slastina, E. M. Makarova, M. T. Syarki, D. S. Konovalov, E. V. Tekanova. DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING CARBON POOLS AND GREENHOUSE GAS FLOWS IN AQUATIC ECOSYSTEMS OF THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA

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

Information is presented about the first stage of research within the Most important Innovative project of National Importance “RITM Carbon” to quantify carbon stocks and fluxes in aquatic ecosystems in a type 1 intensive testing site in the Kivach Nature Reserve (Karelia). The research is carried out as part of a program for monitoring carbon stocks and greenhouse gas (GHG) flows in aquatic ecosystems (water bodies, watercourses) of the boreal zone of North European Russia. Model water bodies were selected (Lake Chudesnaya Lamba, River Sandalka, Chechkin Stream) and a network of observation sites was formed. The landscape structure of the drainage area was studied, the hydrogeological conditions were characterized, and the groundwater table depths and chemical composition were determined. The chemical composition of water in the lake, river and stream in different seasons (mineralization, gas composition, pH, organic matter and nutrients) and the forms of carbon were determined. The lithology and chemical composition of bottom sediments were studied. Quantitative indicators of phyto-, bacterio- and zooplankton development were estimated. A weather station was installed on the shore of the lake and automatic stations were installed in the water column to measure the hydrophysical parameters (water temperature, solar radiation fluxes, currents) necessary to assess the gas transfer coefficient and GHG emissions. Original designs of stationary trapping chambers for monitoring gas emissions from bottom sediments were developed. The first experimental data on GHG fluxes from bottom sediments into the water and at the water-air interface were obtained.

Keywords: aquatic ecosystems; lakes; biota; bottom sediments; GHG; carbon balance and emission; stability of the water column; monitoring

For citation: Lukina Yu. N., Belkina N. A., Kalinkina N. M., Bogdanov S. R., Zobkov M. B., Zdorovenov R. E., Potakhin M. S., Zdorovenova G. E., Tolstikov A. V., Palshin N. I., Borodulina G. S., Bogdanova M. S., Myasnikova N. A., Smirnov S. I., Novikova Iu. S., Gatalskaya E. V., Morozova I. V., Zobkova M. V., Slastina Yu. L., Makarova E. M., Syarki M. T., Konovalov D. S., Tekanova E. V. Development of a system for monitoring carbon pools and greenhouse gas flows in aquatic ecosystems of the European North of Russia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 97–114. doi: 10.17076/lim1954

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS within the Most important Innovative project of National Importance «RITM Carbon» (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

Введение

Озера и водохранилища играют важнейшую роль в глобальном цикле углерода, являясь в парадигме «карбоцентричной лимнологии» приемниками терригенного углерода, местом его биохимической трансформации, захоронения и дальнейшей транспортировки в океан. Роль водоемов в эмиссии углерода в атмосферу определяется биогеохимическим циклом углерода в экосистеме озера [Cole et al., 2007; Tranvik et al., 2009; Köhler et al., 2013; Cremona et al., 2014]. Баланс углерода в водной экосистеме складывается из его поступления с речными водами, дренирующими водосборную территорию, выносом углерода из водоема в гидрографическую сеть, газообменом с атмосферой, а также внутриводоемными биохимическими и физико-химическими процессами [GHG..., 2010]. Роль биоты в цикле углерода в водных экосистемах связана с новообразованием органического вещества (ОВ) и поглощением углекислого газа воды, минерализацией автохтонного и аллохтонного ОВ с выделением CO_2 и с захоронением ОВ.

Считается, что основными источниками CO_2 в мире являются арктические, бореальные некарбонатные озера и пойменные озера Амазонии [Tranvik et al., 2009], которые в силу региональных геохимических особенностей имеют большие субсидии аллохтонного растворенного органического углерода (DOC) гумусовой природы. В связи с этим северные регионы, где в торфяниках сконцентрировано наибольшее количество углерода наземных экосистем, представляют особый интерес. Водные объекты, расположенные на заболоченных территориях Севера, служат своего рода насосами, перекачивающими углекислый газ из болот в конечные водоемы стока.

Республика Карелия расположена на арктических и приарктических территориях, где болота и заболоченные леса занимают более 30 %. Большую часть составляют гумифицированные озера с заболоченным водосбором [Лозовик, 2006]. Несмотря на небольшие размеры, такие водоемы могут вносить существенный вклад в общую эмиссию углерода.

В 2024 г. в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» стартовали научно-исследовательские работы по теме «Разработка системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах Европейского

Севера России». Цель исследований: мониторинг запасов и потоков углерода в озерно-речных системах бореальной зоны Европейского Севера России для достоверной оценки объемов поглощения парниковых газов естественными и антропогенно трансформированными водными экосистемами и ее интеграции в расчеты баланса углерода в наземных экосистемах различных природно-климатических зон РФ.

Задачи 1-го этапа работ:

1. Определение мест закладки пробных площадок. Выявление источников углерода на водосборе, наблюдения за содержанием различных форм углерода в поверхностной и подземной воде, донных отложениях и сопутствующими химическими показателями.

2. Оценка показателей развития бактерио-, фито- и зоопланктона озера.

3. Изучение режима перемешивания озера, оценка индексов устойчивости водной толщи, установление периодов накопления (ледостав, летняя стратификация) и возможной максимальной эмиссии парниковых газов (весеннее перемешивание, заглупление и разрушение сезонного термоклина). Оценка параметров, необходимых для расчета коэффициента газопереноса, по данным метеостанции и автономных станций (измерения температуры воды, скоростей течений, потоков солнечной радиации в водной толще).

4. Разработка конструкций газовой ловушки.

В данной статье приведены описания методик полевых исследований и предварительные результаты обработки полученных в марте-июле 2024 г. данных натурных исследований. Углубленный анализ данных и методика мониторинга запасов углерода и потоков парниковых газов в водных экосистемах бореальной зоны Европейского Севера России будут представлены в следующих публикациях.

Объекты исследования и методы

Первый этап комплексных исследований выполнялся на модельных водных объектах в пределах полигона первого типа в заповеднике «Кивач» (Кондопожский район Республики Карелия) в период с 26 марта по 31 июля 2024 г.: р. Сандалка, руч. Чечкин, оз. Чудесная ламба (рис. 1). Река Сандалка, имеющая длину 14 км и впадающая в р. Суна, дренирует северо-восточную часть полигона. Ниже полигона в нее впадает руч. Чечкин (правый приток р. Сандалка), который принимает сток с юго-западной части полигона. Озеро Чудесная ламба находится на территории полигона и входит в водосборную площадь руч. Чечкин.

Все водные объекты принадлежат Балтийскому бассейновому округу. Водохозяйственный участок и речной подбассейн р. Свирь (включая реки бассейна Онежского озера) относятся к речному бассейну р. Нева (включая бассейны рек Онежского и Ладожского озер).

Озеро Чудесная ламба является типичным представителем малых бессточных озер Карелии с атмосферным питанием, но поскольку данные водные объекты не имеют хозяйственного значения, на территории Карелии они изучены довольно слабо. Озеро относится

к ультрапресным водоемам (<100 мг/л), минерализация воды крайне низкая (1–2 мг/л). Согласно геохимической классификации [Лозовик, 2013], воды его относятся к бесщелочностному кислому классу вод, мезогумусные, дистрофные. По главным ионам относятся к гуматному типу, группе кальция.

Воды р. Сандалка характеризуются самой высокой минерализацией среди модельных объектов, в целом ультрапресные (<100 мг/л), однако в межень наблюдается увеличение их минерализации до 130 мг/л. По геохимической

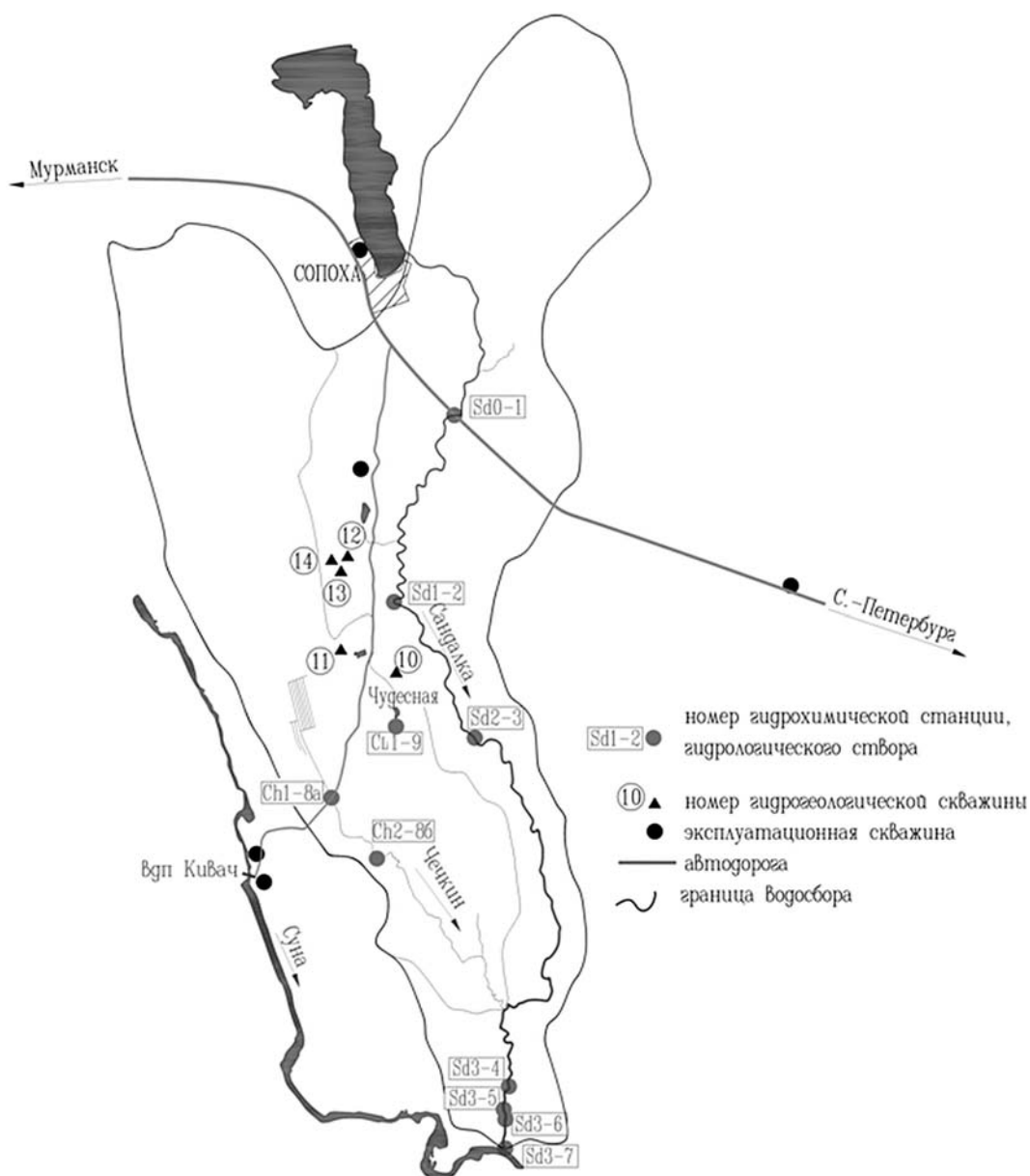


Рис. 1. Схема водосборов реки Сандалка и ручья Чечкин. Положение озера Чудесная ламба. Местоположение створов, скважин и станций измерений

Fig. 1. Scheme of the catchment areas of the Sandalka River and the Chechkin Stream. Location of Lake Chudesnaya Lamba. Location of the sections, wells and measurement stations

классификации [Лозовик, 2013] воды реки относятся к среднещелочным слабокислым нейтральным, мезополигумусные, эвтрофные. По преобладающим ионам это воды гидрокарбонатного класса, группы кальция. Река Сандалка существенно отличается от своего правого притока – руч. Чечкин по химическому составу воды, в первую очередь по величине минерализации и содержанию гидрокарбонатов. Последнее обстоятельство нехарактерно для большинства водотоков северной и центральной частей Карелии, дренирующих хорошо промытые породы. Оно более свойственно рекам южной границы Карелии, в частности южным притокам Онежского озера, дренирующим осадочные породы Русской плиты. Возможно, это объясняется изменениями стока р. Сандалка (сооружением дамбы в истоке), отразившимися на ее течении по хорошо выработанному руслу при малых расходах воды, низким базисом эрозии, а также влиянием подземного стока.

Ручей Чечкин является типичным малым водотоком с болотным питанием, характерным для территории Карелии. Характеризуется низким содержанием минеральных веществ (около 30 мг/л), воды ручья по минерализации относятся к ультрапресным (<100 мг/л); по геохимической классификации [Лозовик, 2013] – к среднещелочным слабокислым нейтральным, полигумусные, мезотрофные; по главным ионам – к гуматному типу, группе кальция, магния. Согласно расчету, водосбор р. Сандалка, включая руч. Чечкин, составляет 48 км².

Гидрогеологические исследования. Работы выполнялись на водосборной территории оз. Чудесная ламба в весенний период (апрель–май 2024 г.). Для характеристики гидрогеологических условий проведены рекогносцировочные маршруты с целью обнаружения естественных выходов подземных вод (родников), выполнены буровые работы для уточнения разреза четвертичных отложений и установления уровня подземных вод в пределах водосборной территории оз. Чудесная ламба (рис. 1, скважины №№ 10–14). Общее количество зондировочных скважин глубиной 1,0–5,7 м составило 5 ед. Для определения химического состава подземных вод выполнен отбор проб воды из эксплуатационных скважин на территории турбазы «Лукоморье» и пос. Сопоха и из безымянной ламбы, имеющей явное подземное питание (нет притоков и наблюдается сток ручьем, расход которого в мае 2024 г. составлял около 3 л/сек).

Привлечены фондовые материалы, содержащие сведения о геологическом разрезе и химическом составе воды в пяти разведочных

и эксплуатационных скважинах на территории заповедника «Кивач». Изучена ландшафтная структура водосбора оз. Чудесная ламба и его окрестностей, выполнено 20 ландшафтных описаний природных комплексов.

Гидрохимические исследования. Отбор проб воды на химический анализ осуществлялся на модельных водных объектах (оз. Чудесная ламба, руч. Чечкин, р. Сандалка) в период с 26 марта по 31 июля 2024 г. и совмещался с гидрологическими работами на водотоках (построение морфостворов, измерение скоростей течений). Перечень определяемых показателей включал: косвенные показатели содержания ОВ (ПО, ХПК, цветность, БПК₅) и формы углерода в воде (ТС, ТОС, DOC, POC, IC, гумусовые вещества), ионный состав (рН, электропроводность, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻), биогенные элементы (P_{мин}, P_{общ}, TN, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, SiO₂), газовый состав воды (O₂, CO₂, H₂S), а также взвешенные вещества. Периодичность отбора составляла 1–2 недели в пик половодья и 3–4 недели в период межени. Общее количество проб воды на комплекс химических показателей на 1-м этапе 2024 г. составило 48 ед., в том числе: 16 проб на оз. Чудесная ламба, 6 – руч. Чечкин, 26 – р. Сандалка.

Отбор проб воды осуществлялся в соответствии с ГОСТ 59024-2020. В качестве пробоотборника использован батометр Руттнера. В период открытой воды пробы отбирались в местах наличия заметного течения с поверхности химическим стаканом. Химический анализ проб воды выполнялся в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ «Карельский научный центр РАН» по методам, изложенным в руководстве [Аналитические..., 2017].

Гидробиологические исследования. Отбор гидробиологических проб осуществлялся в оз. Чудесная ламба на станции CL1-9 (рис. 1) в весенне-летний период 2024 г. (май, июнь и июль). Общее количество проб составило 31 ед., в том числе бактериопланктона – 9, фитопланктона – 9, зоопланктона – 6, на содержание хлорофилла – 7.

Для исследования *бактериопланктона* пробы отбирали на трех горизонтах: поверхностном, пелагиали (1,25–2,00 м), придонном (2,5–3,0 м). Исследования включали количественный учет гетеротрофного и сапрофитного бактериопланктона, а также общее количество водных грибов на плотных питательных средах. Качественный анализ включал определение наличия в пробах сульфитредуцирующих бактерий. Сапрофитные бактерии (СБ) выращивали

на концентрированном производственном рыбо-пептонном агаре (РПА) при 22 °С. Гетеротрофные бактерии (ГБ) высевали на голодный агар РПА : 10 (РПА, разведенный в 10 раз) [Кузнецов, Дубинина, 1989]. Общую численность водных грибов определяли на среде Сабуро с добавлением лимонной кислоты.

Пробы фитопланктона и пробы воды на содержание хлорофилла *a* отбирали из поверхностного слоя воды, а также на горизонтах 1,3 и 2,5 м. Пробы фитопланктона фиксировали 40% раствором формалина и обрабатывали общепринятыми методами [Федоров, 1979]. Концентрацию хлорофилла *a* в пробах воды определяли спектрофотометрическим методом [SCOR-UNESCO..., 1966].

Зоопланктон облавливался сетным методом по слоям. Использовалась сеть Джели с порами 100 мкм. Камеральная обработка производилась по стандартной методике [Методические..., 1984].

Метеорологические, гидрологические и гидрофизические исследования. Скорость ветра является одним из основных параметров, который используется для оценок коэффициента газопереноса, поэтому важной задачей было организовать измерения этого параметра в непосредственной близости от озера. На берегу оз. Чудесная ламба 4 июня 2024 г. установлена метеостанция для наблюдений за скоростью ветра, температурой воздуха, атмосферным давлением, осадками.

Для учета вклада в перемешивание радиационно-генерируемой конвекции необходима оценка потока плавучести [Soloviev, Schluessel, 1994]. С этой целью в озеро установлены автономные станции для длительных измерений температуры воды (термокоса), потоков фотосинтетической солнечной радиации (ФАР) (коса с ФАР-датчиками), течений (акустический доплеровский измеритель течений Aquadopp Nortek Profiler HR (ADCP)) (рис. 2). В оз. Чудесная ламба проведены промеры глубин (рис. 2). В реку в мае установлены автономные станции для длительных измерений давления для расчета расхода воды; данные будут получены в октябре 2024 г.

Термокоса установлена 11 апреля со льда в центральной части озера (рис. 2), оснащена 22 датчиками температуры RBR Ltd (точность 0,002 °С), размещенными со сдвигом по вертикали 15 см, интервал измерений – одна минута. 3 июля коса дополнительно оснащена двумя датчиками кислорода RBR Ltd (диапазон измерений 0–150 %, точность 1 %) на глубинах 0,5 и 3,0 м. Коса будет находиться в озере до начала октября. По данным косы за май и июнь проведен расчет индексов устойчивости (устойчивость Шмидта, озерное число, частота Вайсяля – Брента) с использованием программы LakeAnalyzer [Read et al., 2011].

23 мая – 4 июня и 17 июня – 3 июля 2024 г. на дно озера устанавливали ADCP (рис. 2, б). На следующем этапе исследований по данным термокосы и ADCP будет проведена оценка

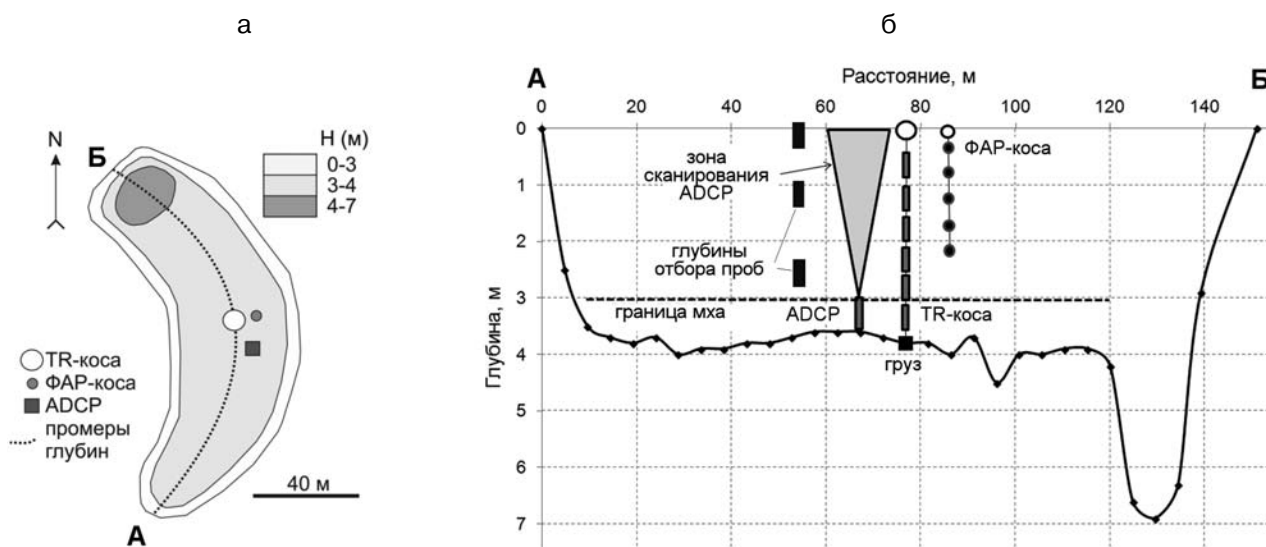


Рис. 2. Схема распределения глубин в оз. Чудесная ламба и положение разреза А–Б и приборов (а); распределение глубин по разрезу А–Б, положение приборов и верхней границы зарослей мха (б)

Fig. 2. Scheme of depth distribution in Lake Chudesnaya Lamba and the position of section А–Б and instruments (а); depth distribution along section А–Б, the position of instruments and the upper boundary of moss thickets (б)

потока плавучести и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности – параметров, необходимых для оценки коэффициента газопереноса.

17 июня 2024 г. в водную толщу озера рядом с температурной косой установлена ФАР-коса с пятью датчиками на глубинах 0,25, 0,75, 1,25, 1,75, 2,25 м. Дискретность измерений – одна минута. Измерения потоков ФАР проводятся с целью определения коэффициента экстинкции и выявления его сезонной изменчивости. Ослабление солнечной радиации по столбу воды играет важную роль в формировании устойчивости водной толщи, а следовательно, в режиме перемешивания.

Измерения течений в р. Сандалка и руч. Чечкин проводились в конце ледостава, в период разрушения льда и на этапе открытой воды прибором Alec Electronics, который помещался в водную толщу и выдерживался на горизонте 1–5 минут, затем полученные данные осреднялись. Предварительно проводились промеры глубин на створах реки и выбиралась оптимальная для измерений течений глубина.

Донные отложения оз. Чудесная ламба были вскрыты двумя скважинами в интервале глубин от 4,9 до 7,6 м (от поверхности воды). Для отбора использовался торфяной бур. Выполнено литостратиграфическое описание кернов донных отложений (ДО), на основе которых они были разделены на слои для изучения гранулометрического и химического состава осадков. Камеральные исследования включали изучение размера частиц и физических характеристик (плотность, пористость, плотность твердой фазы, естественная и абсолютная влажность), физико-химических параметров (рН, Eh), количественного и качественного состава ОВ (потери при прокаливании, $C_{орг}$, гуминовые и фульвовые кислоты, растительные пигменты, потребление кислорода), биогенных элементов (N, P), газового состава (CH_4 , CO_2) и металлов (Fe, Mn).

Изучение потоков парниковых газов. Разработка конструкций газовых ловушек. Диффузионная эмиссия парниковых газов на границе вода-атмосфера изучалась методом плавающих камер. На поверхность воды устанавливалась герметичная камера, в которой в течение времени накапливались парниковые газы, диффундирующие через поверхность воды (рис. 3).

Для ее плавучести по периметру (выше груза) к ловушке крепился «плав» из легких синтетических материалов. Время экспозиции составляло 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30 минут. По окончании времени экспозиции шприцем

(10 мл) протыкалась герметичная лента, закрывающая отверстие в стенке ловушки, и отбирался газ для газохроматографического анализа. Для получения большего объема газа (например, для определения CO_2 титриметрическим методом Субботина – Нагорского [Деметьев и др., 2007]), отбор может осуществляться через отверстие в центре камеры, замещением жидкости из сосуда нужного объема газом из ловушки на основе принципа сообщающихся сосудов.

Диффузионная эмиссия парниковых газов на границе вода-дно изучается с помощью донной камеры-ловушки, которая устанавливается на дно на якорь и поплавке (рис. 4). Стационарные накопительные камеры-ловушки для газов, поступающих из ДО, представляют собой пластиковые (поликарбонатные) емкости с открытым основанием и накопительным резервуаром для сбора газа (стеклянная виала 35 мл или пластиковая пробирка 50 мл) (рис. 4). Время экспозиции 10 мин, 30 мин, 1 час, 2 часа, 1 сутки. По окончании времени экспозиции ловушку медленно поднимают и под водой (не переворачивая ловушку) из нее «горлом вниз» выкручивают накопительный резервуар, который в том же положении сразу заворачивают крышкой.

Данные измерений потока углекислого газа из поверхностного слоя ДО в водную толщу с помощью газовых ловушек показали, что в апреле в воду в течение суток поступало 110 мг CO_2 с 1 м² площади дна. В июне интенсивность потока газа уменьшилась и составила 46 мг CO_2 на м² в сутки. С помощью плавающих газовых ловушек получены первые экспериментальные данные потоков углекислого газа на границе вода-атмосфера (от –140 до 50 мг CO_2 на м² поверхности озера в сутки).

Результаты

Гидрогеологические исследования. Участок работ располагается в пределах западного крыла Онежской палеопротерозойской структуры, сложенной вулканогенно-осадочными образованиями нижнего протерозоя и пластовыми интрузиями долеритов. Породы дислоцированы в серии складок, ось одной из них – Белогорской антиклинали – в восточной части заповедника совпадает с водоразделом рек Суна и Сандалка. Долина последней занимает самое низкое гипсометрическое положение в заповеднике «Кивач», что способствовало накоплению мощных толщ четвертичных отложений. В восточной части заповедника они представлены преимущественно озерно-ледниковыми, озерными глинами

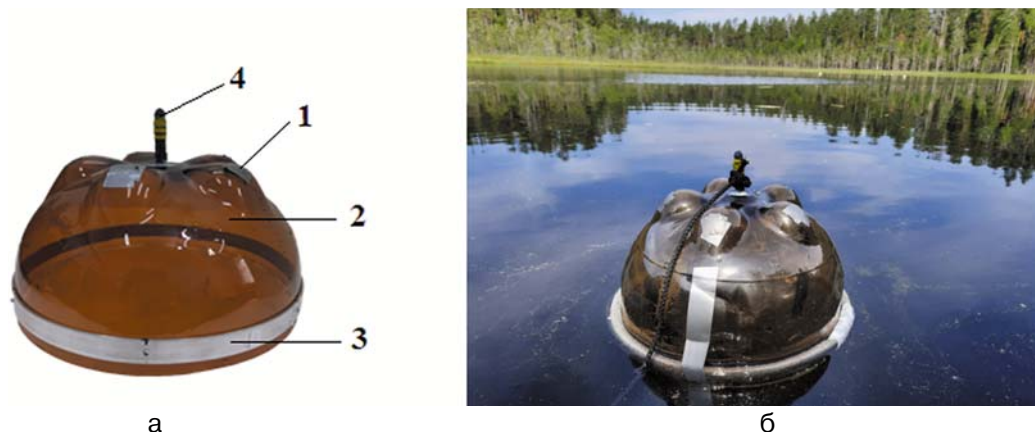


Рис. 3. Внешний вид поверхностной накопительной камеры-ловушки объемом 7 л, площадь основания 630 см² (а):

1 – отверстие для отбора газа шприцем (для газохроматографического анализа), 2 – камера-ловушка, 3 – груз, 4 – отверстие для газового датчика или для отбора большого объема газа из ловушки; вид на газовую камеру-ловушку, установленную на поверхности оз. Чудесная ламба (б)

Fig. 3. External view of the surface accumulation chamber-trap with a volume of 7 l, base area 630 cm² (a):

1 – hole for gas sampling with a syringe (for gas chromatographic analysis), 2 – chamber-trap, 3 – weight, 4 – hole for a gas sensor or for sampling a large volume of gas from the trap; view of the gas chamber-trap installed on the surface of Lake Chudesnaya Lamba (b)

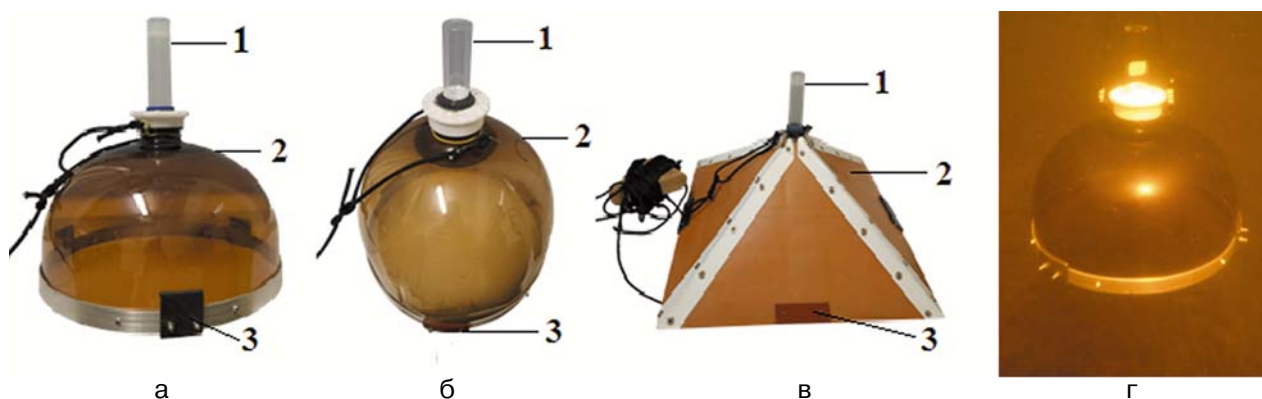


Рис. 4. Внешний вид накопительных камер-ловушек: а – донная накопительная полусферическая объемом 7,6 л, площадь основания 660 см²; б – донная накопительная полусферическая объемом 11,7 л, площадь основания 660 см²; в – донная накопительная пирамидальная объемом 20 л, площадь основания 2500 см² (1 – резервуар для сбора газа, 2 – ловушка, 3 – противовес от опрокидывания); г – вид на накопительную камеру в водной толще озера Чудесная ламба (фото А. В. Толстикова)

Fig. 4. External appearance of the accumulation chambers-traps: a – bottom accumulation hemispherical chambers-trap with a volume of 7.6 l, base area of 660 cm²; б – bottom accumulation hemispherical chambers-trap with a volume of 11.7 l, base area of 660 cm²; в – bottom accumulation pyramidal chambers-trap with a volume of 20 l, base area of 2,500 cm² (1 – gas collection tank, 2 – trap, 3 – counterweight, against tipping over); г – view of the accumulation chamber in the water column of Lake Chudesnaya Lamba (underwaterphoto by A. V. Tolstikov)

и песками и флювиогляциальными гравийно-галечными образованиями, в северо-восточной части – моренными валунными суглинками [Демидов и др., 2006]. В пределах озовых гряд мощность песчано-гравийных отложений достигает 30 м.

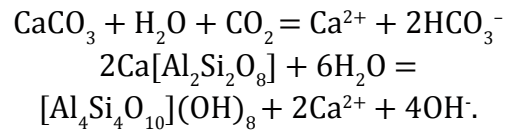
При бурении скважин установлено, что на водосборе р. Сандалка уровень подземной

воды в сглаженном виде повторяет рельеф местности и в пределах песчаных и песчано-гравийных отложений на водоразделах залегают на глубинах 3–6 м (скв. 12–14, рис. 1). При наличии в разрезе глинистых прослоев отмечается верховодка (скв. 11). Величина гидравлического градиента для естественного потока подземных вод составляет 0,001–0,004,

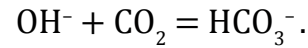
коэффициент фильтрации для разнозернистых песков 40 м/сут. Таким образом, песчаные образования на водоразделе рек Суна и Сандалка характеризуются хорошей водопроницаемостью и обеспечивают существенный подземный приток в озерно-речную сеть. Модуль подземного стока в р. Суна в районе Пальеозерской ГЭС один из самых высоких в бассейне Онежского озера и составляет 3 л/с·км², а коэффициент подземного питания рек, характеризующий долю подземного стока в общем речном стоке, достигает 60 % [Ресурсы..., 1987].

Гидрогеологические условия региона способствуют достаточно быстрому проникновению атмосферных осадков в рыхлые и трещиноватые породы верхней части разреза. В этих условиях химический состав подземных вод определяется сравнительно малым временем взаимодействия воды с породами. Минерализация воды в скважине, пройденной в песках, составляет 0,08 г/л, рН 7,22. Вода глубоких скважин, вскрывающих водоносный горизонт подстилающих коренных пород, более минерализована – до 0,46 г/л, возрастает доля хлоридов. Величина рН достигает значения 8,15, вода лишь одной скважины в верховье р. Сандалка имеет рН 6,15. Состав подземной воды гидрокарбонатный кальциевый (натриево-магниевый). Формы углерода определены в одной скважине (база «Лукоморье»): общий органический углерод 3,2 мгС/л, при рН 7,22 растворенный углекислый газ 5,4 мг/л.

Формированию гидрокарбонатного типа подземной воды способствует хорошая расчлененность рельефа и активный водообмен. Катионный состав в этих условиях практически полностью контролируется составом исходных минералов. Природа анионного состава, в отличие от катионов, является гидрогенно-биогенной. Роль ОВ почв заключается в обогащении подземных вод углекислым газом, а одним из путей удаления углекислоты из почвы, что является обязательным условием непрерывности микробиологических процессов, служит вынос CO₂ инфильтрационными водами. В результате подземные воды обогащаются углекислым газом в количестве, значительно превышающем его парциальное давление в атмосфере. Это резко увеличивает агрессивные свойства воды относительно алюмосиликатов и карбонатов. Маломинерализованные воды (менее 100 мг/л) обладают значительным потенциалом углекислотной агрессивности: большая часть CO₂ (до 95 %) находится в агрессивной форме [Шварцев, 1998]. Растворение карбонатов и гидролиз алюмосиликатов происходит по обобщенным схемам:



Вся активность OH⁻, формирующаяся при разложении силикатов, преобразуется в HCO₃⁻:



Таким образом, подземные воды являются непрерывными преобразователями почвенного углекислого газа, поступающего с инфильтрационными водами в водоносный горизонт, и обеспечивают формирование подземных вод гидрокарбонатного типа. Подземный сток с водосборной территории в пределах развития флювиогляциальных отложений оказывает решающее влияние на формирование химического состава р. Сандалка, что выражается в резком увеличении минерализации речной воды в зимнюю и летнюю межень (электропроводность достигает 205 мкСм/см) по сравнению с минимальными показателями в период половодья 33–42 мкСм/см. Минерализация речной воды возрастает в основном за счет гидрокарбонатов кальция и магния, в меньшей степени за счет хлоридов.

Гидрохимические исследования.

В оз. Чудесная ламба в составе общего углерода (ТС) преобладает органический (ТОС – 8,6 ± 0,9 мгС/л, 69 % от ТС) с доминированием растворенных форм (DOC – 7,5 ± 0,4 мгС/л, 88 % от ТОС). Показано, что вариабельность содержания ТС в озере связана с изменением в содержании его взвешенных форм, а также CO₂. Анализ сезонной динамики углекислого газа свидетельствует о широком диапазоне изменения его концентраций в воде оз. Чудесная ламба (4,4–19,5 мг/л), высокие значения которых отмечены в период ледостава (12,7–19,5 мг/л), а трехкратное снижение – после разрушения ледового покрова в мае (4,4–11,4 мг/л). В летний период концентрация углекислого газа сохранялась на уровне весенних значений (4,4–10,2 мг/л).

В р. Сандалка в период зимней межени отмечено повышенное содержание неорганических форм, в которых доля CO₂ составляет 14 % от ТС (5,1 мгС/л), и резкое падение доли неорганического углерода в период весеннего половодья, сопровождаемое снижением концентрации CO₂. В руч. Чечкин преобладали органические формы (22,4–42,2 мгС/л, 76–88 % от ТС), доля неорганического углерода составляла 2–9 % от общего с минимальными значениями в период половодья (конец апреля – начало мая). В обоих водотоках установлено

высокое содержание углекислого газа в подледный период (20 мг/л) и двукратное его сокращение после вскрытия льда (10 мг/л).

В составе органического углерода во всех модельных объектах преобладали гумусовые вещества, что характерно для поверхностных вод [Ma et al., 2001; Linnik et al., 2013]. В составе гумусовых веществ преобладали фульвовые кислоты. Это связано с тем, что по сравнению с фульвовыми кислотами гуминовые обладают меньшей основностью и интенсивно закрепляются в почвах в виде комплексов с ионами металлов, поэтому для них характерна меньшая растворимость в воде, а значит, поступление с водосборной территории ограничено [Лапин, Красюков, 1986].

Максимум латерального стока всех форм углерода с модельными водотоками наблюдался в пик весеннего половодья (в устье р. Сандалка в конце апреля до 7,8 тС/сутки), что было обусловлено повышенным выносом общего органического углерода и CO_2 . После окончания половодья отмечалось увеличение выноса неорганического углерода и снижение выноса CO_2 . Удельный вынос ТС с территории водосбора модельных объектов колебался от 0,02 до 0,25 гС/м² в сутки и в среднем за изучаемый период для замыкающего створа изучаемого водосбора (устья р. Сандалка) составлял примерно 0,1 гС/м² сутки.

Метеорологические измерения. Средняя температура воздуха за июнь-июль составила 17,40 °С, максимальное значение (32,43 °С) было зафиксировано 29 июня в 17.00, минимальное (4,15 °С) – 8 июня в 03.55. Суточный ход температуры воздуха был хорошо выражен, разница между максимальными значениями в дневные часы и минимальными в ночные достигала 10–20 °С, в периоды похолоданий – уменьшалась до 1–5 °С (рис. 5, а). Среднее значение атмосферного давления за весь период наблюдений – 752 мм рт. ст. Скорость ветра не превышала 4 м/с в июне-июле (рис. 5, а), средняя скорость составила 0,63 м/с. Преобладал ветер северо-западного сектора (рис. 5, б).

Гидрофизические процессы в озере Чудесная ламба. Исследования финских озер (см. обзор в [Miettinen et al., 2015]) показали многократный рост эмиссии парниковых газов после освобождения ото льда и на этапе разрушения сезонного термоклина, поэтому важной задачей наших исследований было установить периоды разрушения льда, весеннего и осеннего перемешивания оз. Чудесная ламба. По данным термокосы установлено, что освобождение оз. Чудесная ламба ото льда произошло 8 мая, водная толща озера находилась

в перемешанном состоянии около четырех суток – до 12 мая. Учитывая небольшие размеры ламбы (длина ~150 м, ширина 30–50 м) и залесенность берегов, а также тот факт, что скорость ветра, измеренная в непосредственной близости от ламбы, в июне-июле не превышала 4 м/с, можно утверждать, что ветровое воздействие на ее поверхность незначительно. С 12 мая начался быстрый прогрев поверхностного слоя, и установилась стратификация. За первую неделю стратификация оз. Чудесная ламба резко усилилась – разница температур поверхностного и придонного слоев озера превысила 15 °С к 19 мая.

На протяжении мая-июня температура поверхностного слоя озера повышалась и достигла 24–25 °С, при этом температура воды глубже 3,5 м не превышала 5–6 °С. В ночные часы происходило конвективное перемешивание и формирование поверхностного перемешанного слоя, днем этот слой опять стратифицировался. Глубина нижней границы перемешанного слоя достигла 1,75 м к концу июня. Скорость заглупления нижней границы перемешанного слоя оз. Чудесная ламба в сезонном аспекте была соизмерима с этим показателем другого небольшого лесного озера – Голубой ламбы, в котором перемешивание на этапе весенне-летнего нагревания также происходит главным образом под действием радиационного механизма [Богданов и др., 2023]. Особенности изменения температуры воды на разных глубинах водного столба оз. Чудесная ламба, быстрое установление стратификации после освобождения ото льда, короткий период весеннего перемешивания, высокие показатели устойчивости водного столба на этапе весенне-летнего нагревания (устойчивость Шмидта 20–30 Дж/м², озерное число 20–145, частота плавучести 0,005–0,025 с⁻²) позволяют отнести оз. Чудесная ламба к димиктическим водоемам [Kirillin, Shatwell, 2016]. В придонных слоях таких озер на этапе летней стратификации часто создаются условия для накопления парниковых газов, эмиссия которых с поверхности озер резко возрастает в период разрушения сезонного термоклина [Miettinen et al., 2015]. На следующем этапе исследований по данным термокосы будет оценена величина коэффициента газопереноса, согласно подходу, изложенному в работе [Soloviev, Schluessel, 1994].

Величина потока ФАР на глубине 0,25 м достигала 2500–3000 мкмоль/(м²·с), на глубине 2,25 м редко превышала 20–30 мкмоль/(м²·с). Коэффициент экстинкции в слое 0,25–2,25 м слабо увеличивался в период с 19 июня по 3 июля 2024 г. от 1,5 до 1,8 м⁻¹.

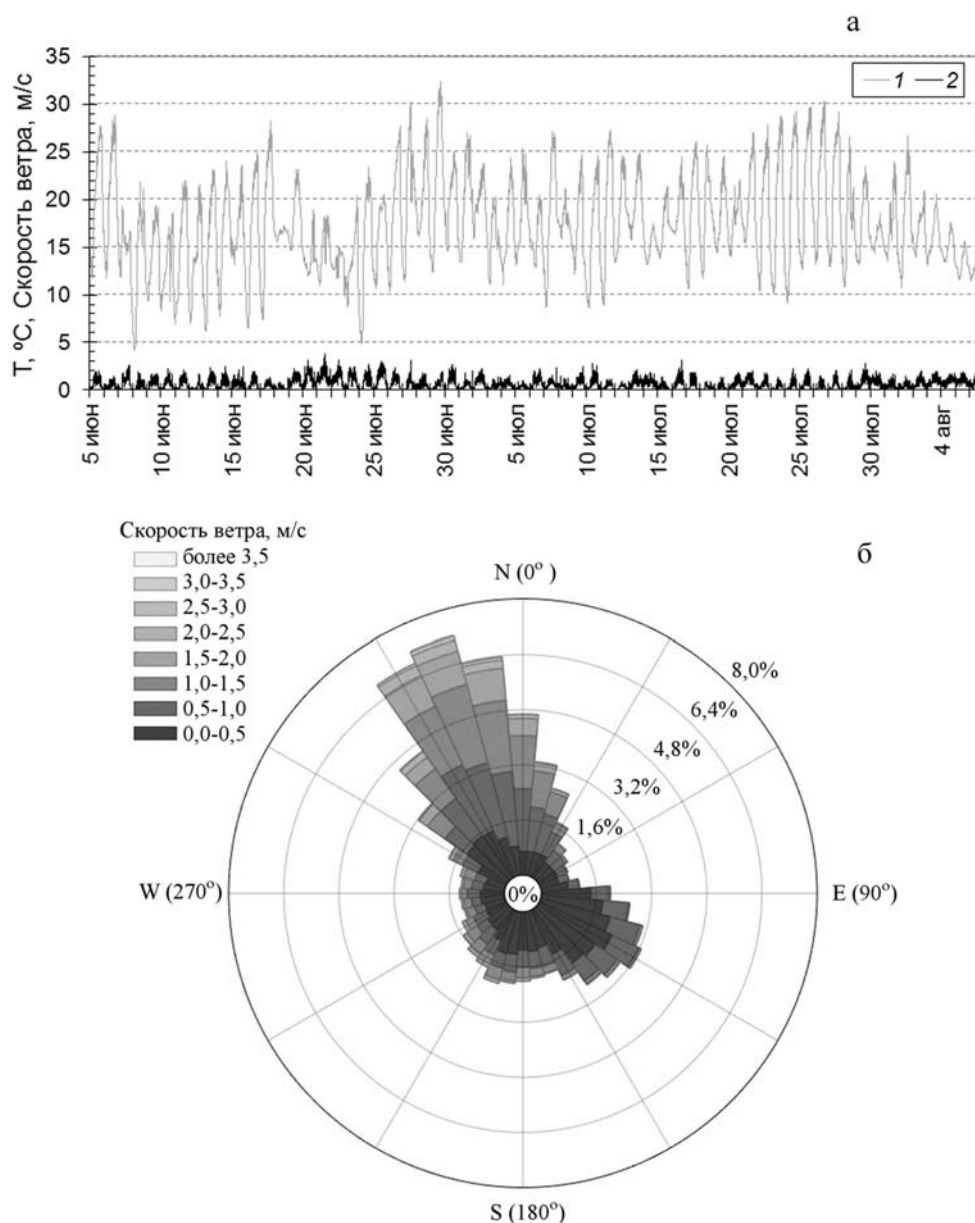


Рис. 5. Скорость ветра, измеренная на метеостанции на берегу озера Чудесная ламба в июне–июле 2024 г. (а); роза ветров за июнь–июль 2024 г. (б)

Fig. 5. Wind speed measured at the weather station on the shore of Lake Chudesnaya Lamba in June-July 2024(a); The wind rose for June-July 2024 (б)

Гидрологические исследования. Наибольшие скорости течений в р. Сандалка и руч. Чечкин наблюдались в период активного снеготаяния и разрушения льда (конец апреля) и достигали 0,15–0,55 м/с. В замыкающем створе р. Сандалка расходы воды в зимнюю и летнюю межень составляли 0,8–0,9 м³/с, при этом в период половодья, пик которого пришелся на начало апреля, расход воды поднялся до максимума 3,3 м³/с. В руч. Чечкин расход составлял 0,01 м³/с в период межени, 1,7 м³/с в период половодья.

Гидробиологические исследования. Одной из задач исследований было изучение роли биоты в процессах трансформации ОВ в оз. Чудесная ламба. На первом этапе получена характеристика планктонных сообществ этого водоема.

Бактериопланктон оз. Чудесная ламба характеризовался высокими показателями развития. Средние значения в воде показателей общей численности и биомассы бактерий составили в мае 3,95 млн кл./мл и 0,75 г/м³, в июне – 3,83 млн кл./мл и 0,52 г/м³, в июле – 2,85 млн кл./мл и 0,45 г/м³ соответственно.

Высокие показатели ТОС (27,4 мгС/л), а также высокие показатели бактериопланктона могут свидетельствовать о потреблении ОВ бактериями, а также возможной высокой их активности в трансформации органического углерода и, соответственно, в пополнении экосистемы углекислым газом [Kritzberg et al., 2006].

В фитопланктоне в мае 2024 г. доминантом по биомассе являлись представители динофитовых, устойчивых к низким значениям pH и не зависящих от цветности вод. По численности доминировали зеленые водоросли. Наиболее часто встречаемые виды фитопланктона в водоеме в этот период – *Peridinium umbonatum* var. *goslavience* (Wolos.), *P. inconspicuum* Lemm., *Coenocystis planctonica* Korschik., *Coenochloris pyrenoidosa* Korschik. Диатомовые представлены *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz., золотистые – *Dinobryon divergens* O. E. Imhof. Численность и биомасса достигали значений 817,5 тыс. кл./л и 5,6 г/м³ соответственно. В июне биомасса фитопланктона значительно уменьшилась, также сменился комплекс доминирующих видов. Сохранилась относительно высокая численность за счет мелкоклеточных форм планктона. Основу численности и биомассы создавали золотистые водоросли, *Dinobryon divergens*, образывавшие разветвленные кустистые колонии до 25–40 клеток. Появились цианобактерии, в основном представленные колониями *Chroococcus disperses* (Keiss.) Lemm. Численность и биомасса достигали значений 805 тыс. кл./л и 0,65 г/м³ соответственно. Уровень продуктивности оз. Чудесная ламба в весенний и раннелетний период 2024 г. варьировал. Концентрация хлорофилла *a* в мае 2024 г. составила 8,3 мкг/л, в июне – 1,6–2,4 мкг/л, в июле – 1,9–3,2 мкг/л.

Количественные показатели зоопланктона в целом свидетельствовали о небольших показателях его развития в оз. Чудесная ламба. В мае 2024 г. было отмечено 7 таксонов с рангом рода и ниже. В этот период основу численности и биомассы сообщества составляли копепоидитные стадии *Cyclops* sp. Индекс Шеннона – Уивера по численности 1,56 за счет многочисленных коловраток. По биомассе индекс Шеннона – Уивера был необычно низким (0,21) из-за доминирования *Cyclops* sp. В июне количество идентифицированных видов зоопланктона увеличилось до 12. Основу сообщества составляли копепоидитные стадии рачка *Eudiaptomus graciloides*. Кроме того, значительную долю биомассы (22,61 %) представляла *Diaphanosoma brachyurum*. Биоразнообразие сообщества зоопланктона по величине индекса Шеннона –

Уивера составляло по численности 1,14, по биомассе – 1,29.

В целом полученные сведения о количественном развитии и структуре планктона в весенний и раннелетний период в кислотной мезогумозной Чудесной ламбе хорошо соотносятся с выявленными закономерностями развития планктонных сообществ в лесных разнотипных кислотных озерах Дарвиновского заповедника (Вологодская область) [Структура ..., 1994].

На следующем этапе исследований будет выполнена оценка роли планктона в балансе углерода и трансформации аллохтонного ОВ в оз. Чудесная ламба.

Донные отложения оз. Чудесная ламба содержат большое количество растительных остатков и являются плохо сортированными осадками, в составе которых преобладает крупная фракция (0,063–0,5 мм) (табл.).

Например, по размеру частиц керн можно разделить на три участка (4,93–5,91; 5,91–7,10 и 7,10–7,50 м), которые соответствуют временным периодам с разными седиментационными обстановками (малое озеро – переходный период – приледниковый водоем). Включения торфа (в интервале 5,91–7,10 м, переходный период) свидетельствуют о значительных колебаниях уровня водоема, вплоть до полного осушения водоема и функционирования на этом месте болотной экосистемы.

Предварительный анализ данных химического состава ДО озера подтверждает наличие выделенных на основе литологии трех периодов с разными условиями осадконакопления в истории озера. ДО, накопленные в период Онежского приледникового озера (ОПО) (обнаружены в основании керна, ст. 2401), закономерно имеют минеральный характер: зольность 94 %, С_{орг} 1 %, ППП 1,4 %. Осадки, формировавшиеся в период климатических изменений после изоляции озера от ОПО, отличаются значительным градиентом концентраций ОВ (изменение по вертикали ППП от 1,4 до 92 %, С_{орг} – от 1 до 50 %).

В голоцене водоем становится накопителем ОВ: содержание С_{орг} колеблется в пределах 47–58 %, ППП – 92–96 %. Значительно изменяется качественный состав ОВ, захороненного в ДО озера: от планктоногенного (где С/N = 13 и С/P = 48) до осадков смешанного генезиса с высокой долей высшей водной и наземной растительности (где С/N изменяется от 18 до 104 и С/P – от 40 000 до 106 000). Появление почв на водосборе маркируется в колонке ДО ростом концентраций металлов (Fe, Mn), которые начинают поступать в водоем в составе железо-гумусовых комплексов.

Характеристика донных отложений озера Чудесная ламба
 Characteristics of bottom sediments in Lake Chudesnaya Lamba

Скважина Well	Керн (диапазон глубины, м) Core sample (depth range, m)	Глубина от уреза воды, м Depth from the water edge, m	Полевое описание Field description
24-01	24-01-01 (7,00–8,00)	7,00–7,26	Темно-бурая гиттия, от 7,21 до 7,26 м – серовато-бурая гиттия с включениями растительных макроостатков (мох) Dark brown gyttia, from 7.21 to 7.26 m – grayish brown gyttia with inclusions of plant macroremains (moss)
		7,26–7,28	Светло-коричневый прослой гиттии с мелкими частицами торфа Light brown layer of gyttia with small peat particles
		7,28–7,29	Прослой бурого сильно разложившегося торфа, нижние 3 мм отличаются по цвету (серые) Layer of brown, highly decomposed peat, the lower 3 mm differ in color (gray)
		7,29–7,32	Сфагновый торф цветом от желтовато-коричневого до бурого, сильно разложившийся, плотный Sphagnum peat, yellowish-brown to brown in color, highly decomposed, dense
		7,32–7,45	Алеврит плотный, цвет изменяется сверху вниз градиентом от бурого до серого Dense silt, the color varies from top to bottom in a gradient from brown to gray
		7,45–8,00	Алеврит сизо-серый, в нижней части (7,80–8,00 м) глинистый, слабо выраженная слоистость Dove-gray silt, in the lower part (7.80–8.00 m) clayey, weak layering
	24-01-02 (6,50–7,50)	6,50–6,80	Верхняя часть вымыта из отборника Upper part is washed out of the sampler
		6,80–7,10	Подушка из мха Cushion of moss
		7,10–7,31	Темно-бурая гиттия Dark brown gyttia
		7,31–7,33	Прослой бурого сильно разложившегося торфа Layer of brown, highly decomposed peat
		7,33–7,50	Алеврит Silt
24-02	24-02-01 (7,00–8,00)	4,93–5,06	Темно-бурая обводненная гиттия Dark brown watered gyttia
		5,06–5,70	Темно-бурая оторфованная гиттия со значительной долей макроостатков Dark brown peaty gyttia with a significant proportion of macroremains
		5,70–5,77	Гиттия уплотненная с сильно разложившимися макроостатками, цвет от темно-бурого до черного Indurated gyttia with highly decomposed macroremains, color from dark brown to black
		5,77–5,78	Бежевая прослойка (как в керне 24-01-01) Beige layer (as in core sample 24-01-01)
		5,78–5,91	Торф плотный, сильно разложившийся, в нем: 5,78–5,84 м – бежевато-серый, 5,84–5,87 м – от рыжевато-бурого до черного, 5,87–5,91 м – бурый, опесчаненный мелкозернистым песком Dense peat, highly decomposed, including: 5.78–5.84 m – beige-gray, 5.84–5.87 m – from reddish-brown to black, 5.87–5.91 m – brown, with fine-grained sand
		5,91–5,93	Сизо-серый алеврит, опесчаненный мелкозернистым песком Dove-gray silt, with fine-grained sand

Интересным является факт, что для голоценовых ДО (последние 7–8 тыс. лет), несмотря на разный литологический состав осадков (что свидетельствует об изменчивости гидрологических условий водоема) и на разный качественный состав их ОВ (что говорит о различиях в его происхождении), характерно стабильное содержание $C_{\text{орг}}$ по всей вертикали этого участка керна. С учетом средней концентрации органического углерода за время голоцена под квадратным метром площади дна озера в ДО захоронено около 70–100 кг $C_{\text{орг}}$. Таким образом, экосистема малого болотного озера в условиях гумидного климата изымает (безвозвратно, в масштабах человеческой жизни) из атмосферы CO_2 со скоростью около 1 кг $C_{\text{орг}}$ на 1 кв. м площади дна за 100 лет.

Заключение

Приведены результаты комплексных экспедиционных исследований на трех модельных водных объектах (оз. Чудесная ламба, р. Сандалка, руч. Чечкин), на которых сформирована сеть станций наблюдений для выполнения задач ВИП ГЗ «Ритм углерода».

Дана характеристика гидрогеологических условий, определены глубины залегания и химический состав подземных вод. Проведен количественный учет бактериопланктона озера. Получена характеристика планктонных сообществ озера Чудесная ламба.

Определены даты окончания ледостава (8 мая), весеннего перемешивания (8–12 мая), начала летней стратификации (12 мая). Показано, что на этапе весенне-летнего нагревания ветровая нагрузка на поверхность озера невелика и превалирует конвективный механизм перемешивания в ночные часы. Заглубление нижней границы перемешанного слоя происходит медленно (1,75 м к концу июня), что также свидетельствует о незначительном ветровом воздействии. Получены гидрофизические параметры (ряды длительных измерений температуры воды, скоростей течений, потоков солнечной радиации в толще воды), необходимые для расчета коэффициента газопереноса, который будет использован на втором этапе исследований для оценки эмиссии парниковых газов с поверхности озера. Оз. Чудесная ламба можно отнести к полимиктическому типу, что создает предпосылки к накоплению парниковых газов в придонном слое на этапе весенне-летнего нагревания. На этапе осеннего охлаждения и разрушения сезонного термоклина ожидаемо усиление эмиссии парниковых газов с поверхности ламбы.

В рамках гидрохимических исследований определен химический состав воды озера, реки и ручья в разные сезоны (минерализация, газовый состав, pH, ОВ и биогенные элементы) и определены формы нахождения углерода. Установлено, что в целом во всех исследованных модельных водных объектах превалирует общий органический углерод с доминированием его растворенных форм, имеющих в основном терригенное происхождение. Однако сезонная динамика общего содержания углерода и вклада его различных форм для оз. Чудесная ламба, р. Сандалка и руч. Чечкин имела свои характерные особенности. Установлено высокое содержание углекислого газа в модельных водных объектах в подледный период (до 20 мг/л) и двукратное его сокращение после разрушения ледового покрова. Дана предварительная оценка латерального стока углерода на водосборе, свидетельствующая о максимальном его выносе с водотоками в пик весеннего половодья (7,8 тС/сутки, р. Сандалка), обусловленная повышенным выносом общего органического углерода и CO_2 .

В рамках палеогеографических исследований выполнено изучение ландшафтной структуры полигона в заповеднике «Кивач». На оз. Чудесная ламба выполнены буровые работы (опробованы 2 скважины) и получено 2 керна ДО в интервале глубин от 4,9 до 7,6 м (от поверхности воды). Изучение литологии и химического состава ДО выявило, что оз. Чудесная ламба в условиях гумидного климата как элемент ландшафта территории полигона выполняет функцию накопителя ОВ. Установлено, что мощность слоя аккумулярованных органических осадков (со средним содержанием $C_{\text{орг}} = 50\%$), сформированных в голоцене, не превышает 2 м. Скорость накопления углерода низкая и составляет около 1 кг $C_{\text{орг}}$ на 1 кв. м площади дна за 100 лет.

Литература

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

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

Дементьев Е. П., Казадаев В. А., Синягин А. М., Цепелева Е. В. Методические указания к лабораторным работам по разделу определение газового

состава воздуха животноводческих помещений. Уфа, 2007. 36 с.

Демидов И. Н., Лукашов А. Д., Ильин В. А. Рельеф заповедника «Кивач» и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. Вып. 10. С. 22–33.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.

Лапин И. А., Красюков В. Н. Роль гумусовых веществ в процессах комплексообразования и миграции металлов в природных водах // Водные ресурсы. 1986. № 1. С. 134–145.

Лозовик П. А. Гидрохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. докт. хим. наук. М., 2006. 59 с.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–593.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л., 1984. 33 с.

Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии / Отв. ред. В. С. Самарина. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1987. 151 с.

Структура и функционирование экосистем кислотных озер / Отв. ред. В. Т. Комов. СПб.: Наука, 1994. 246 с.

Федоров В. Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. М.: МГУ, 1979. 168 с.

Шварцев Л. С. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 287 с.

Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget // *Ecosystems*. 2007. Vol. 10. P. 172–185. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

Cremona F., Kõiv T., Nõges P., Pall P., Rõõm E.-I., Feldmann T., Viik M., Nõges T. Dynamic carbon budget of a large shallow lake assessed by a mass balance approach // *Hydrobiologia*. 2014. Vol. 731, iss. 1. P. 109–123. doi: 10.1007/s10750-013-1686-3

GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs / UNESCO/IHA Greenhouse Gas Status of Freshwater Reservoirs Project; General Ed. J. A. Goldenfum. London: IHA, 2010. URL: <https://www.hydropower.org/publications/ghg-measurement-guidelines-for-freshwater-reservoirs> (дата обращения: 15.08.2024).

Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // *Earth-Science Rev.* 2016. Vol. 161. P. 179–190. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.08.008

Köhler S. J., Kothawala D., Futter M. N., Liungman O., Tranvik L. In-lake processes offset increased terrestrial inputs of dissolved organic carbon and color to lakes // *PLoS One*. 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0070598

Kritzberg E. S., Cole J. J., Pace M. M., Granéli W. Bacterial growth on allochthonous carbon in humic and

nutrient-enriched lakes: Results from whole-lake ¹³C addition experiments // *Ecosystems*. 2006. Vol. 9. P. 489–499. doi: 10.1007/s10021-005-0115-5

Linnik P. N., Ivanechko Ya. S., Linnik R. P., Zhezherya V. A. Humic substances in surface waters of the Ukraine // *Russian Journal of General Chemistry*. 2013. Vol. 83, no. 13. P. 2715–2730. doi: 10.1134/S1070363213130185

Ma H., Allen H. E., Yin Y. Characterization of isolated fractions of dissolved organic matter from natural waters and a wastewater effluent // *Water Res.* 2001. Vol. 35. P. 985–996. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00350-X

Miettinen H., Pumpanen J., Heiskanen J. J., Aaltonen H., Mammarella I., Ojala A., Levula J., Rantakari M. M. Towards a more comprehensive understanding of lacustrine greenhouse gas dynamics – two-year measurements of concentrations and fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a typical boreal lake surrounded by managed forests // *Boreal Env. Res.* 2015. Vol. 20. P. 75–89.

Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., Muraoka K., Winslow L. A., Kroiss R., Wu Ch. H., Gaiser E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // *Environmental Modelling & Software*. 2011. Vol. 26, iss. 11. P. 1325–1336. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006

SCOR-UNESCO Working Group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water // *Monographs on Oceanographic Methodology*. No. 1. Paris: UNESCO, 1966. 69 p.

Soloviev A. V., Schluessel P. Parameterization of the temperature difference across the cool skin of the ocean and the air-ocean gas transfer on the basis of modeling surface renewal // *J. Phys. Oceanogr.* 1994. Vol. 24. P. 1339–1346.

Tranvik L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, no. 6(2). P. 2298–2314.

References

Bogdanov S. R., Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Mitrokhov A. V., Kuznetsov P. S., Novikova Yu. S., Zdorovenova G. E. Evaluation of the mixing efficiency of a small dimictic lake during surface cooling. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundam. Appl. Hydrophysics*. 2023;16(2):73–88. (In Russ.). doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(2)-6

Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*. 2007;10: 172–185. doi:10.1007/s10021-006-9013-8

Cremona F., Kõiv T., Nõges P., Pall P., Rõõm E.-I., Feldmann T., Viik M., Nõges T. Dynamic carbon budget of a large shallow lake assessed by a mass balance approach. *Hydrobiologia*. 2014;731(1): 109–123. doi: 10.1007/s10750-013-1686-3

Dementyev E. P., Kazadaev V. A., Sinyagin A. M., Tsepeleva E. V. Guidelines for laboratory work on determining the gas composition of air in livestock buildings. Ufa; 2007. 36 p. (In Russ.)

Demidov I. N., Lukashov A. D., Il'in V. A. Relief of the Kivach Reserve and the geological evolution of the North-western Prionezhye in the Quaternary period. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2006. Iss. 10. P. 22–33. (In Russ.)

Fedorov V. D. On methods of studying phytoplankton and its activity. Moscow: MGU; 1979. 168 p. (In Russ.)

Goldenfum J. A. (ed.). GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. UNESCO/IHA Greenhouse Gas Status of Freshwater Reservoirs Project. London: IHA; 2010. URL: <https://www.hydropower.org/publications/ghg-measurement-guidelines-for-freshwater-reservoirs> (accessed: 15.08.2024).

Guidelines for collecting and processing materials in hydrobiological studies of freshwater bodies. Zooplankton and its production. Leningrad; 1984. 33 p. (In Russ.)

Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes. *Earth-Science Rev.* 2016;161:179–190. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.08.008

Köhler S. J., Kothawala D., Futter M. N., Liungman O., Tranvik L. In-lake processes offset increased terrestrial inputs of dissolved organic carbon and color to lakes. *PLoS One*. 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0070598

Komov V. T. (ed.). Structure and functioning of acid lake ecosystems. St. Petersburg: Nauka; 1994. 246 p. (In Russ.)

Kritzberg E. S., Cole J. J., Pace M. M., Granéli W. Bacterial growth on allochthonous carbon in humic and nutrient-enriched lakes: Results from whole-lake ¹³C addition experiments. *Ecosystems*. 2006;9:489–499. doi: 10.1007/s10021-005-0115-5

Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. Methods of studying aquatic microorganisms. Moscow: Nauka, 1989. 288 p. (In Russ.)

Lapin I. A., Krasnyukov V. N. Role of humic substances in the processes of complex formation and migration of metals in natural waters. *Vodnye resursy = Water Resources*. 1986;1:134–145. (In Russ.)

Linnik P. N., Ivanechko Ya. S., Linnik R. P., Zhezherya V. A. Humic substances in surface waters of the Ukraine. *Russian Journal of General Chemistry*. 2013;83(13): 2715–2730. doi: 10.1134/S1070363213130185

Lozovik P. A. Geochemical classification of surface waters of the humid zone based on their acid-base balance.

Vodnye resursy = Water Resources. 2013;40(6):583–593. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrochemical criteria for the state of surface waters in the humid zone and their resistance to anthropogenic impact: Summary of DSc (Dr. of Chem.) thesis. Moscow; 2006. 59 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Efremenko N. A. (eds.). Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)

Ma H., Allen H. E., Yin Y. Characterization of isolated fractions of dissolved organic matter from natural waters and a wastewater effluent. *Water Resources*. 2001;35:985–996. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00350-X

Miettinen H., Pumpanen J., Heiskanen J. J., Aaltonen H., Mammarella I., Ojala A., Levula J., Rantakari M. M. Towards a more comprehensive understanding of lacustrine greenhouse gas dynamics – two-year measurements of concentrations and fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a typical boreal lake surrounded by managed forests. *Boreal Env. Res.* 2015;20:75–89.

Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., Muraoka K., Winslow L. A., Kroiss R., Wu Ch. H., Gaiser E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software*. 2011;26(11):1325–1336. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006

Samarina V. S. (ed.). Resources and geochemistry of groundwater in Karelia. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1987. 151 p. (In Russ.)

SCOR-UNESCO Working Group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water. *Monographs on Oceanographic Methodology*. No. 1. Paris: UNESCO; 1966. 69 p.

Shvartsev L. S. Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone. Moscow: Nedra; 1998. 287 p. (In Russ.)

Soloviev A. V., Schluessel P. Parameterization of the temperature difference across the cool skin of the ocean and the air-ocean gas transfer on the basis of modeling surface renewal. *J. Phys. Oceanogr.* 1994;24:1339–1346.

Tranvik L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol. Oceanogr.* 2009;54(6-2):2298–2314.

Поступила в редакцию / received: 27.08.2024; принята к публикации / accepted: 18.09.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лукина Юлия Николаевна

д-р биол. наук, директор

e-mail: jlukina@list.ru

Белкина Наталья Александровна

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

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

CONTRIBUTORS:

Lukina, Yulia

Dr. Sci. (Biol.), Director

Belkina, Natalya

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

Калинкина Наталья Михайловна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидробиологии

e-mail: cerioda@mail.ru

Богданов Сергей Рэмович

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

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

Зобков Михаил Борисович

канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Здоровеннов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Потехин Максим Сергеевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

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

Здоровеннова Галина Эдуардовна

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

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Толстиков Алексей Владимирович

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

e-mail: alexeytolstikov@mail.ru

Пальшин Николай Иннокентьевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: npalshin@mail.ru

Бородулина Галина Сергеевна

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

e-mail: bor6805@yandex.ru

Богданова Мария Сергеевна

младший научный сотрудник

e-mail: mari-mb@mail.ru

Мясникова Надежда Александровна

канд. геогр. наук, младший научный сотрудник

e-mail: gold_dream@mail.ru

Смирнов Сергей Игоревич

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

e-mail: sergeysmirnov92@mail.ru

Новикова Юлия Сергеевна

аспирант, младший научный сотрудник

e-mail: novyuliana@gmail.com

Гатальская Екатерина Владимировна

младший научный сотрудник

e-mail: katusha9210@yandex.ru

Морозова Ирина Валерьевна

младший научный сотрудник

e-mail: ivm1502@yandex.ru

Kalinkina, Natalya

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

Bogdanov, Sergey

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

Zobkov, Mikhail

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

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Potakhin, Maxim

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Zdorovennova, Galina

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

Tolstikov, Alexey

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

Palshin, Nikolai

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Borodulina, Galina

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

Bogdanova, Maria

Junior Researcher

Myasnikova, Nadezhda

Cand. Sci. (Geog.), Junior Researcher

Smirnov, Sergey

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

Novikova, Iulia

Graduate Student, Junior Researcher

Gatalskaya, Ekaterina

Junior Researcher

Morozova, Irina

Junior Researcher

Зобкова Мария Валентиновна

канд. хим. наук, научный сотрудник

e-mail: rincalika21@yandex.ru

Сластина Юлия Леонидовна

младший научный сотрудник

e-mail: jls@inbox.ru

Макарова Елена Михайловна

младший научный сотрудник

e-mail: emm777@bk.ru

Сярки Мария Тагевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: msyarki@mail.ru

Коновалов Даниил Сергеевич

аспирант, инженер-исследователь

e-mail: konovalov.daniil1998@gmail.com

Теканова Елена Валентиновна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: etekanova@mail.ru

Zobkova, Maria

Cand. Sci. (Chem.), Researcher

Slastina, Yulia

Junior Researcher

Makarova, Elena

Junior Researcher

Syarki, Maria

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Konovalov, Daniil

Graduate Student, Research Engineer

Tekanova, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

УДК 551.89

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНСТИТУТЕ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН ПОСЛЕДНЕГО ДЕСЯТИЛЕТИЯ – ЛИТОСТРАТИГРАФИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Д. Д. Кузнецов

Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105)

Приводятся результаты работ по изучению динамики и особенностей поздне- и послеледникового осадконакопления в озерах ряда географических областей северо-запада и севера Европейской России: в Ладожском озере, в малых озерах Приладожья, Карельского перешейка и Прибеломорья. Выявленные особенности осадконакопления в этих озерах позволили продвинуться в решении таких важных палеогеографических задач, как детализация хронологии балтийско-ладожского голоценового соединения, установления максимального уровня ладожской трансгрессии, установления времени максимальной биологической продуктивности в озерных экосистемах в голоцене, хронологии перемещения уровня береговой линии Белого моря в голоцене. Установлено время начала органонакопления в малых озерах северной части Карельского перешейка, расположенных на трассе Гейниокского палеопролива – 3000–3500 кал. л. н. Выявлено, что установление озерных обстановок осадконакопления в котловинах этих озер происходило постепенно. Установлено принципиальное различие в строении осадков малых озер Приладожья в зависимости от их высотного и пространственного положения. Выделены этапы голоценового органонакопления в отложениях Ладожского озера. Временной период максимального накопления органического вещества определен в интервале 5200–9500 кал. л. н. Реконструирована динамика перемещения береговой линии Белого моря в голоцене на различных участках побережья. Установлено, что в озерах Соловецкого архипелага, расположенных на отметках 22–35 м над ур. моря, озерное осадконакопление происходило начиная с 10 500–11 000 кал. л. н.

Ключевые слова: донные отложения; озерное осадконакопление; органическое вещество в отложениях; голоцен; изоляционные бассейны; Ладожское озеро; Карельский перешеек; Белое море

Для цитирования: Кузнецов Д. Д. Палеолимнологические исследования в Институте озероведения РАН последнего десятилетия – литостратиграфический аспект // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 115–127. doi: 10.17076/lim1906

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по темам FFZF-2024-0001 и FFZF-2024-0002.

D. D. Kuznetsov. PALEOLIMNOLOGICAL RESEARCH AT THE INSTITUTE OF LIMNOLOGY RAS IN THE LAST DECADE – THE LITHOSTRATIGRAPHIC ASPECT

Institute of Limnology, St. Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences (9 Sevast'yanova St., 196105 St. Petersburg, Russia)

The article presents the results of studies on the dynamics and features of late- and post-glacial sedimentation in lakes of a number of geographical regions of the north-west and north of European Russia: in Lake Ladoga, in small lakes of the Ladoga region, the Karelian Isthmus and the White Sea region. The identified features of sedimentation in these lakes made it possible to advance in solving such important paleogeographic problems as detailing the chronology of the Baltic-Ladoga Holocene connection, establishing the maximum level of the Ladoga transgression, establishing the time of maximum biological productivity in lake ecosystems in the Holocene, the chronology of the relative sea level changes in the White Sea region in the Holocene. The time when organic accumulation began in small lakes in the northern part of the Karelian Isthmus, located in the path of the Heinjoki paleo-strait, was determined as 3000–3500 cal. BP. It was revealed that the establishment of lacustrine sedimentation environments in the basins of these lakes proceeded gradually. The structure of sediments in small lakes in the Ladoga region was found to have fundamental differences depending on their altitude and spatial position. The stages of Holocene organic matter accumulation in the sediments of Lake Ladoga were identified. The time period of maximum accumulation of organic matter was determined in the range of 5200–9500 cal. BP. The White Sea shoreline displacements in the Holocene in various areas of the coast have been reconstructed. It has been established that in lakes of the Solovetsky archipelago, located at 22–35 m above sea level, lacustrine sedimentation started at 10 500–11 000 cal. BP.

Keywords: lake sediments; lacustrine sedimentation; organic matter in sediments; the Holocene; isolation basins; Lake Ladoga; Karelian Isthmus; White Sea

For citation: Kuznetsov D. D. Paleolimnological research at the Institute of Limnology RAS in the last decade – the lithostratigraphic aspect. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 115–127. doi: 10.17076/lim1906

Funding. The work was implemented within state assignment to INOZ SPC RAS (FFZF-2024-0001 and FFZF-2024-0002).

Введение

В январе 2024 г. исполнилось 80 лет Институту озероведения РАН. Палеолимнологические (и палеогеографические) исследования всегда были важной частью его деятельности. Работы Н. И. Семеновича, А. В. Шнитникова, Д. Д. Квасова, Б. И. Кошечкина, Н. Н. Давыдовой, И. Ю. Неуструевой, Д. А. Субетто и многих других специалистов внесли значительный вклад в развитие направления [70 лет..., 2017].

В последнее десятилетие палеолимнологические исследования в институте охватывают ряд тем, среди которых важное место занимают исследования голоценовой динамики береговой линии крупных бассейнов (Балтийское и Белое моря, Ладожское и Онежское озера) с использованием метода изоляционных бассейнов и палеоэкологические реконструкции, основанные на изучении динамики органического вещества в колонках донных отложений.

Изучение литостратиграфии донных отложений озер – первый этап любого палеолимнологического исследования. Содержание

органического вещества является одной из важнейших характеристик озерных отложений и наряду с размерностью частиц лежит в основе большинства их классификаций. Целью данной статьи является обзор некоторых результатов работ группы палеолимнологии за последнее десятилетие в аспекте изучения литостратиграфии озерных осадков. Наши работы позволили выявить ряд особенностей органонакопления в озерах севера и северо-запада Европейской России, имеющих значение для указанных выше палеогеографических реконструкций.

В статье приводятся результаты работ по изучению динамики и особенностей поздне- и послеледникового осадконакопления в озерах четырех географических областей: в малых озерах Приладожья; в собственно Ладожском озере; на трассе Гейниокского палеопротока (Карельский перешеек); в малых озерах Прибеломорья.

Материалы и методы

Проведены исследования на Ладожском озере и малых озерах Приладожья и Прибеломорья

(рис. 1). Экспедиционные работы осуществлялись в рамках исследований ИНОЗ РАН (СПб ФИЦ РАН) и в ходе совместных работ с РГПУ им. А. И. Герцена и Карельским научным центром РАН. Колонки донных отложений на малых озерах отбирались русским торфяным буром с плота, со льда или со сплавины; на Ладожском озере – ударной трубкой системы ГОИН с длиной пробоотборной части от 1 до 1,5 м с борта НИС «Эколог» и «Посейдон». Колонки разбирались в лаборатории сплошными сегментами, преимущественно по 2 см. Содержание органического вещества в образце оценивалось по потере веса при прокаливании в течение 6 часов при температуре 550 °С. Значительная часть результатов опубликована, данная статья представляет собой обзор публикаций последних лет.

Результаты и обсуждение

1. Малые озера Приладожья. После отступления ледника на северо-западе Европейской России существовали крупные морские и пресноводные бассейны (Балтийское ледниковое, Анциловое, Ладожское и Онежское озера, Иольдиевое, Литориновое и Балтийское моря) [напр., Квасов, 1975; Субетто, 2009].

Малые озера, располагающиеся по периферии этих бассейнов, развивались в тесной связи с трансгрессивно-регрессивной деятельностью последних. За последние 12 000 лет многие из ныне изолированных малых озер, находящиеся на относительно низких абсолютных отметках, входили в определенные периоды своей истории в состав крупных палеоводоемов [Кузнецов, Субетто, 2019]. Выявлены некоторые особенности осадконакопления для озер Приладожья, характеризующие этапы их развития.

Существует несколько общих сценариев голоценовой динамики накопления органического вещества. 1) Сценарий раннеголоценового максимума – после позднеплейстоценовой смены минерогенного осадконакопления органическим, выраженным в стратиграфии началом формирования гиттии, фиксируются максимальные значения содержания органического вещества, а далее в течение голоцена происходит его снижение, иногда ступенеобразное. 2) Сценарий среднеголоценового максимума – рост содержания органического вещества в отложениях происходит постепенно, достигая максимума в середине разреза, после чего начинается его снижение. 3) Сценарий роста – в течение всего голоцена происходит постепенное увеличение содержания органического

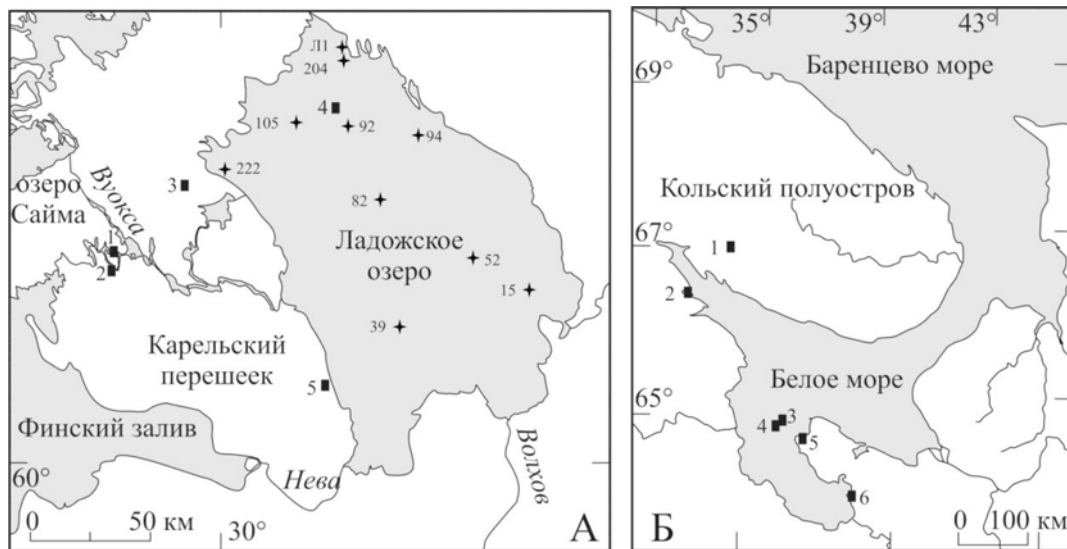


Рис. 1. Местоположение упоминаемых разрезов:

квадраты – озера и группы озер, звездочки – станции пробоотбора; А: 1 – озера северной протоки Гейниокского палеопролива, 2 – озера его же южной протоки, 3 – Узловое озеро, 4 – Витальевское озеро, 5 – озеро Воляярви; Б: 1 – озеро Канозеро, 2 – озера полуострова Киндо, 3 – озера острова Анзер, 4 – озера Большого Соловецкого острова, 5 – озера Онежского полуострова, 6 – озеро Пертозеро

Fig. 1. Site location:

rectangles – lakes and groups of lakes, stars – sampling stations; A: 1 – lakes tracing the northern channel of the Heinjoki paleo-strait, 2 – lakes tracing the southern one, 3 – Lake Uzlovoe, 4 – Lake Vitalievskoe, 5 – Lake Volojarvi; Б: 1 – Lake Kanozero, 2 – lakes of the Kindo Peninsula, 3 – lakes of the Anzer Island, 4 – lakes of the Bol'shoi Solovetsky Island, 5 – lakes of the Onega Peninsula, 6 – Lake Pertozero

вещества в отложениях. 4) Платообразный сценарий – после резкого роста значений в нижней части разреза на протяжении всего голоцена условия накопления органического вещества практически не меняются, оставаясь на одном уровне [напр., Kuznetsov, 2016].

Однако соединение ныне обособленных озерных котловин с крупными водоемами и их изоляция от последних в ходе геологической истории осложняет данные сценарии (рис. 2, А, Б). В таких котловинах фиксируются отложения: 1) стадии крупного бассейна (с низким содержанием органического вещества), 2) переходного (изоляционного) этапа, 3) стадии малого озера (с высоким содержанием органического вещества) [Лудикова и др., 2016; Kuznetsov et al., 2020]. Процесс изоляции сопровождается резким ростом содержания органического вещества в отложениях, при этом иногда отмечается эрозионный контакт (горизонт размыва). Такого рода ход осадконакопления характерен для озер, изолировавшихся от Ладожского озера и расположенных в Северном и Северо-Западном Приладожье [Saarnisto, Grönlund, 1996; Лудикова и др., 2005; Saarnisto, 2012; Сапелко и др., 2014, 2023; Кузнецов и др., 2015, 2023; Alenius et al., 2020]. В их котловинах осадки с высоким содержанием органического вещества начинают формироваться не в начале

голоцена, а в более позднее время, зависящее от времени изоляции.

Южная часть Приладожья во время ладожской трансгрессии также заливалась водами Ладожского озера, однако высотные отметки ее максимума здесь остаются предметом дискуссий [напр., Кошечкин, Экман, 1993; Малаховский и др., 1993; Лудикова, 2015]. Особенности строения и состава донных отложений (отсутствие перехода от глинистого алеврита/глинистой гиттии к гиттии во второй половине голоцена) в озерах Южного Приладожья свидетельствуют о недостижении ладожской трансгрессией отметок 14–16 м над ур. моря в этой части Приладожской низменности (рис. 2, В) [Кузнецов, Субетто, 2019; Кузнецов и др., в печати]. Значительное поступление аллохтонного материала, выраженное в повышенном содержании минерального вещества в осадке, может осложнять типичный региональный ход осадконакопления, в общем виде представляющий собой смену минерогенных отложений крупного бассейна органогенными отложениями малого озера [Кузнецов, 2019].

2. Ладожское озеро. Строение донных отложений Ладожского озера является предметом длительного изучения [напр., Семенович, 1966; Subetto et al., 1998]. Работы последних лет основаны на материале изучения колонок, отбиравшихся по всей акватории озера

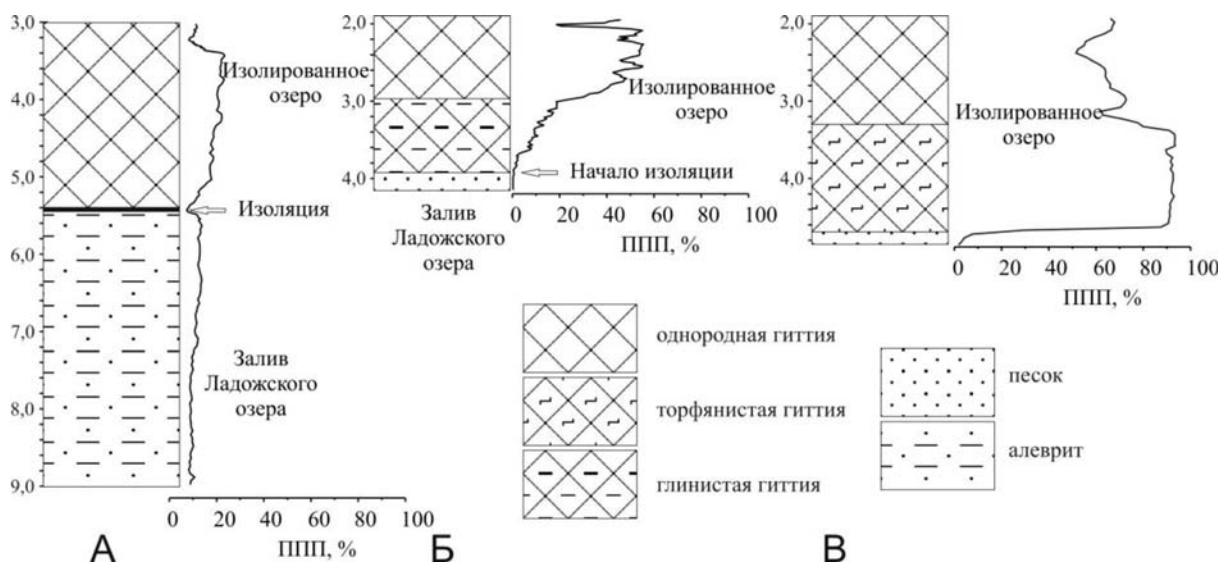


Рис. 2. Динамика органонакопления в малых озерах, изолировавшихся от Ладожского озера по завершении ладожской трансгрессии (А и Б), и в озерах, проникновение вод Ладожского озера в которые в позднем голоцене не отмечается (В), на примере озер Узловое, Витальевское и Воляярви:

ось ординат – глубина от поверхности воды, м [по: Кузнецов, Субетто, 2019; Сапелко и др., 2023]

Fig. 2. Organic sedimentation dynamics in small lakes isolated from Lake Ladoga at the end of the Ladoga transgression (A and B), and in lakes where the penetration of Lake Ladoga waters in the late Holocene was not recorded (B) on the example of lakes Uzlovое, Vitalievskoe and Volojarvi:

y-axis – depth from the water surface, m [after Kuznetsov, Subetto, 2019; Sapelko et al., 2023]

начиная с 2016 г. [Кузнецов и др., 2021]. Проведен анализ потерь при прокаливании более 20 колонок, отобранных с глубин 20–208 м; мощность вскрытых отложений составила 0,3–1,7 м, содержание органического вещества в колонках лежит в диапазоне 0,7–13 % (при средних значениях для колонок 2–8 %), в поверхностных пробах – в диапазоне 0,2–20 %. Отложения представлены в основном серыми и светло-бурыми осадками преимущественно глинистой (пелитовой) и алевритовой размерности, в южной, более мелководной части котловины преобладают песчаные осадки. В поверхностных горизонтах отмечаются рудные (железистые) корки.

Литостратиграфические границы в основном не выражены, переходы по цвету и составу осадков постепенные. Во многих колонках отмечается два отчетливых максимума содержания органического вещества и довольно заметный спад после первого максимума. Это позволило выделить несколько периодов органонакопления [Кузнецов, Субетто, 2021]: 1) позднеледниковый минимум содержания органического вещества, 2) рост, 3) среднеголоценовый максимум (средние значения в большей части колонок около 8 %), 4) резкий спад и минимальные значения, 5) позднеголоценовый/современный максимум (рис. 3). Выраженность этих

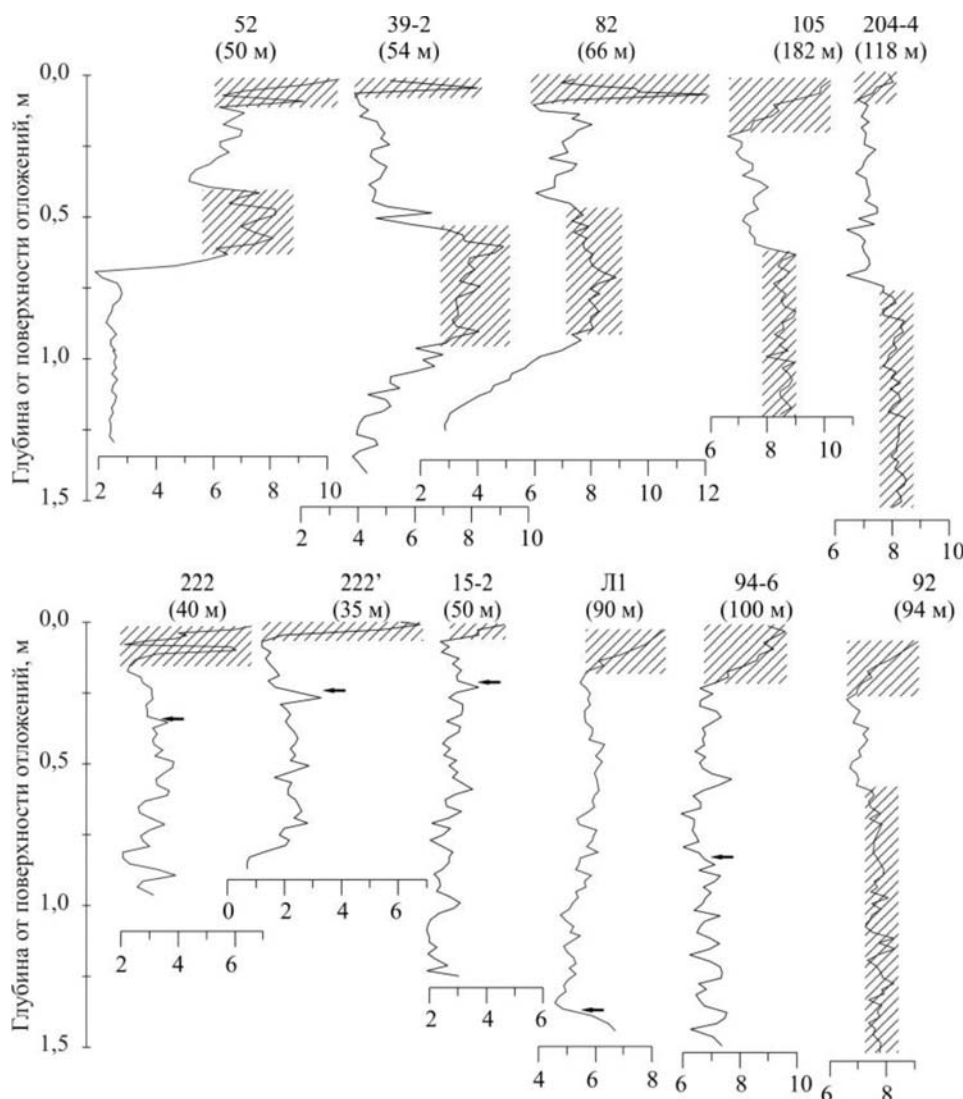


Рис. 3. Голоценовая динамика органонакопления в отложениях Ладожского озера: штриховка – хорошо выраженные периоды с максимальным накоплением органического вещества, стрелка – возможное завершение среднеголоценового максимума; ось абсцисс – потери при прокаливании, % [по: Кузнецов, Субетто, 2021]

Fig. 3. The Holocene organic sedimentation dynamics in Lake Ladoga: shading – clearly identified periods with maximum accumulation of organic matter, arrow – possible completion of the mid-Holocene maximum; x-axis – loss on ignition, % [after Kuznetsov, Subetto, 2021]

периодов зависит от пространственного положения станции пробоотбора.

Данные периоды проявляются наиболее отчетливо в отложениях центральной части озера (рис. 1, А и рис. 3, станции 39, 52, 82). Отложения из северной и периферийных частей озера (станции 92, 94, 105, 204), как правило, имеют более сглаженный ход органонакопления, особенно это касается завершения среднеголоценового максимума. Вероятной причиной данной особенности является меньшая глубина центральной части озера (50–70 м), соответственно, любые изменения в продуктивности водной экосистемы и в гидродинамических условиях, воздействующих на перемещение взвешенного вещества, проявляются в составе отложений более отчетливо. На больших глубинах подобные сигналы нивелируются. В колонках, отобранных по периферии озера, часто отмечается значительное своеобразие характера осадконакопления, вызванное увеличением влияния аллохтонного компонента из-за близости берега (станции 15, Л1, 94, 222) [напр., Ludikova et al., 2021].

По данным радиоуглеродного датирования колонки со станции 39 [Sapelko et al., 2024], рост содержания органического вещества в осадках начинается около 10 700 кал. л. н. Максимальная доля органического вещества в осадке фиксируется в период около 9500–5900 кал. л. н., после чего отмечено его резкое падение. Скорость осадконакопления при этом остается постоянной, с незначительным трендом к уменьшению – около 0,10–0,14 мм/год.

Эти возрастные рубежи несколько отличаются от полученных ранее данных по колонке со станции 82 [Sapelko et al., 2019], где отмечена аналогичная динамика органонакопления. Отбор образцов на датирование и ППП на этой станции проводился из разных кернов, однако, учитывая близкие литологические характеристики осадка и исходя из усредненной скорости осадконакопления в 0,10–0,11 мм/год, период с максимальным накоплением органического вещества можно датировать здесь интервалом 8600–5200 кал. л. н.

Принимая данную оценку возраста, можно предварительно сделать вывод, что в южной части акватории Ладожского озера условия, благоприятные для накопления органического вещества, наступили и закончились раньше, чем в центральной части озера.

3. Гейниокский палеопроток. Исследования озерных отложений, отобранных на трассе Гейниокского палеопротока в северной части Карельского перешейка, проводились с целью уточнить время и характер прекращения

существовавшего здесь голоценового балтийско-ладожского соединения [напр., Малаховский и др., 1993].

В начале XXI в. специалистами ИНОЗ РАН изучались озера, находящиеся на трассе южной протоки палеопротока [Dolukhanov et al., 2007, 2009; Субетто и др., 2009] на отметках 12–14 м над ур. моря. Однако для большей детализации хронологии существования здесь проточных условий необходимы были новые исследования.

В результате работ, выполненных на пяти озерах, располагающихся на трассе северной протоки палеопротока на отметках 14–16 м над ур. моря, выявлен близкий ход голоценового осадконакопления (рис. 4). Нижняя часть разрезов сложена преимущественно глинистыми отложениями, иногда ленточного типа. Выше отмечается горизонт песка, иногда с гравием, мощностью до 40 см. Верх разрезов в открытой части озер сложен гиттией мощностью до 2–3 м. В прибрежной части гиттия сменяется торфянистыми отложениями сплавин [Кузнецов и др., 2020].

Данная стратиграфия интерпретируется следующим образом. Формирование глин соответствует этапу существования здесь большого олиготрофного бассейна – Балтийского ледникового озера и, возможно, Анцилового озера. Накопление песков связано с активными гидродинамическими условиями во время существования канала стока из Ладожского озера. Начало накопления гиттии вызвано прекращением функционирования балтийско-ладожского соединения и установлением слабopоточных условий малого озера [Ludikova et al., 2024].

Полученный массив дат определяет время начала органонакопления диапазоном 2500–4500 кал. л. н., при том что большинство датировок лежит в пределах 3000–3500 кал. л. н. (рис. 4) [Кузнецов и др., 2022б]. Этот возраст определяет время прекращения полноценного функционирования Гейниокского пролива, что обычно связывается с возникновением реки Невы. Однако более древние даты начала органонакопления получены для отложений Воробьиного озера – расположенного наиболее высоко из изученных здесь (16 м над ур. моря), что свидетельствует также о существенном значении гляциоизостатического поднятия в процессах переформирования гидрологической сети региона. Установлено, что даже в пределах одного озера начало органонакопления происходило не одновременно. В частях котловины, расположенных ближе к основному створу пролива (область 1 на рис. 4, Б),

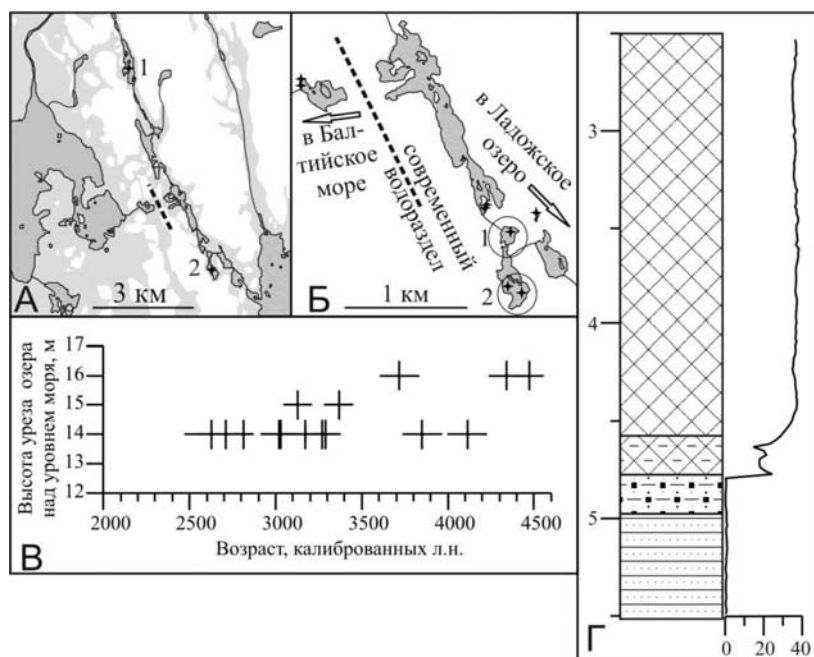


Рис. 4. Местоположение исследованных озер северной протоки Гей-ниокского палеопротола и типичный для них ход осадконакопления:

А – общий вид; серым выделена область, заливаемая при уровне воды в 20 м над ур. м.; Б – положение точек пробоотбора; В – время начала формирования гиттии; Г – литостратиграфия и потери при прокаливании для озера Хамеенлампи, точка 2 [по: Кузнецов и др., 2022б]

Fig. 4. Location of the studied lakes of the northern channel of the Heinjoki paleo-strait and their typical sedimentation pattern:

A – general view; The area flooded at a water level of 20 m above the sea level is highlighted in gray; Б – location of the sampling points; В – time of the beginning of gyttia formation; Г – lithostratigraphy and LOI for Lake Hameenlampi, point 2 [after Kuznetsov et al., 2022б]

подошва гиттии датируется более поздним временем по сравнению с периферийными в этом смысле частями озера (область 2 на рис. 4, Б).

4. Малые озера Прибеломорья. Установление хронологии голоценового перемещения береговой линии Белого моря – важное направление региональных палеогеографических исследований. Сложное наложение разномасштабных тектонических движений на эвстатические изменения уровня Мирового океана делает необходимым проведение данного рода реконструкций по всему беломорскому побережью [напр., Колька, Корсакова, 2017].

Применение метода изоляционных бассейнов для решения подобных палеогеографических задач широко распространено [напр., Колька и др., 2005; Субетто, 2010]. Работы ИНОЗ РАН на Белом море в данном направлении начались в 2006 г. на озерах Большого Соловецкого острова [Субетто и др., 2012; Ludikova et al., 2023b] и далее были продолжены в сотрудничестве с ИИМК РАН на озерах Кандалакшского берега [Сапелко и др., 2022;

Ludikova et al., 2022, 2023a], а также с ИВПС КарНЦ РАН и РГПУ им. А. И. Герцена на озерах Онежского [Леонтьев и др., 2016, 2022] и Карельского [Kuznetsov et al., 2022] берега.

Среди изученных нами объектов – остров Анзер, второй по площади остров Соловецкого архипелага, где были отобраны колонки на девяти разновысотных озерах, большинство из которых на ранних этапах своего развития входили в состав крупных бассейнов [Кузнецов и др., 2022а]. Изоляция заливов и преобразование их в малые озера происходили на протяжении всего голоцена. Наиболее долгую самостоятельную историю имеют озера, располагающиеся на более высоких абсолютных отметках.

Преобразование залива крупного бассейна в малое пресноводное озеро проявляется в осадках формированием переходного горизонта, где резко нарастает содержание органического вещества (рис. 5) [Кузнецов и др., 2018]. Часто в переходном горизонте отмечается тонкая слоистость, свидетельствующая об установлении в данной части котловины

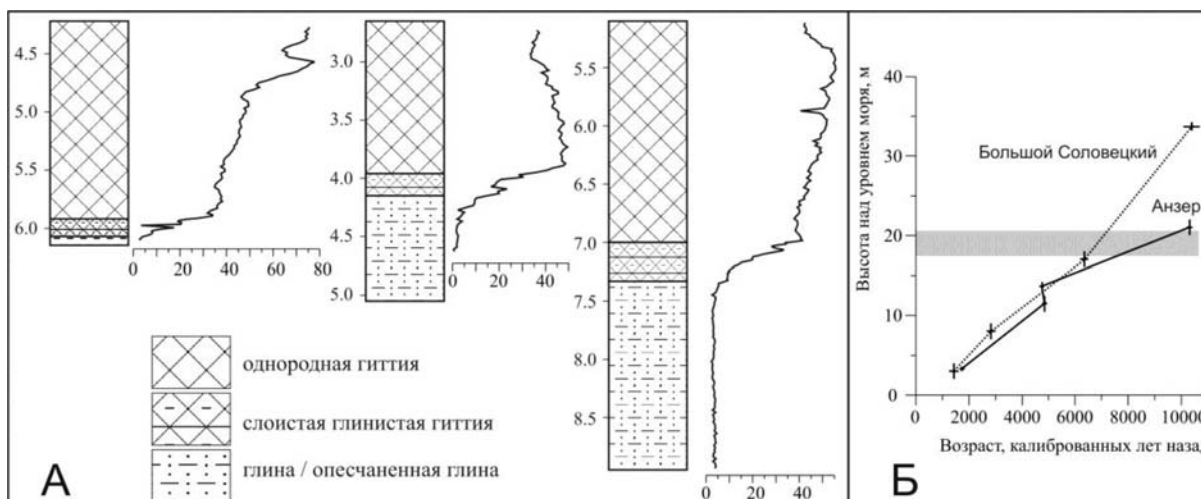


Рис. 5. Литостратиграфические изменения в колонках из изоляционных бассейнов острова Анзер (А) и кривые изменения уровня моря для Соловецких островов (Б) [по: Кузнецов и др., 2022a]

Fig. 5. Lithostratigraphic changes in cores from the isolation basins of the Anzer Island (A) and relative sea-level change curves for the Solovetsky Islands (Б) [after Kuznetsov et al., 2022a]

меромиктических условий. Отмеченная мощность слоистого горизонта в исследованных озерах составила от 12 до 34 см с содержанием органического вещества от 5 до 34 %.

Формирование бурой однородной гиттии с содержанием органического вещества 20–50 % фиксирует завершение изоляции и самостоятельное развитие водоема. Скорость накопления гиттии составила в основном около 0,2–0,3 мм/год, хотя в отдельных случаях может достигать 1 мм/год.

Проведенное радиоуглеродное датирование подошвы гиттии позволило установить возраст изоляции озер от крупных бассейнов. Для озер Соловецкого архипелага, расположенных на отметках 22–35 м над ур. моря, он составил около 10 500–11 000 кал. л. н. Перемещение береговой линии ниже 11 м над ур. моря произошло около 4800–4400 кал. л. н., а ниже 2 м над ур. моря – около 1900–1700 кал. л. н. Таким образом, усредненная скорость отступления береговой линии (регрессии) составила около 2–3 мм над ур. моря в год. Принимая во внимание данные из [Субетто и др., 2012; Ludikova et al., 2023b], положение верхней морской границы для Соловецкого архипелага установлено в диапазоне 17–21 м (рис. 5, Б) [Кузнецов и др., 2022a].

Заключение

В результате исследований донных отложений озер севера и северо-запада Европейской России выявленные особенности позднего и послеледникового осадконакопления (время

начала формирования гиттии, закономерности динамики содержания органического вещества и др.) позволили выполнить следующие палеогеографические реконструкции.

1. Малые озера Приладожья развивались в тесной связи с трансгрессивно-регрессивной деятельностью Ладожского озера и пра-Ладожских бассейнов. Установлено принципиальное различие в строении осадков малых озер Приладожья в зависимости от их высотного и пространственного положения. В отложениях большинства озер (за исключением южной части) четко фиксируется смена условий осадконакопления, вызванная изоляцией этих озер от крупных бассейнов.

2. Выделены этапы голоценового органонакопления в Ладожском озере по результатам изучения более чем 20 колонок. В большинстве разрезов реконструируется два периода относительно высокого накопления органического вещества – около 5200–9500 кал. л. н. и период, близкий к современности. Изменения в содержании органического вещества часто визуально не выражены, что позволяет использовать эти данные для корреляции разрезов из разных частей озерной котловины.

3. Изучение отложений серии разновысотных озер, располагающихся на трассе северной протоки бывшего Гейниокского пролива, позволило датировать прекращение соединения между Ладожским озером и Балтийским морем в северной части Карельского перешейка. Выявлено, что, несмотря на прекращение стока 3000–3500 кал. л. н., окончательное установление озерных обстановок осадко-

накопления в котловинах озер, находящихся на трассе палеопротола на современных отметках 14–16 м над ур. моря, произошло на несколько сотен лет позднее.

4. Реконструировано перемещение береговой линии Белого моря в голоцене на некоторых участках Кандалакшского, Карельского и Онежского берегов. Установлено, что в озерах Соловецкого архипелага, располагающихся на отметках 22–35 м над ур. моря, озерное осадконакопление происходило начиная с 10 500–11 000 кал. л. н.

Автор признателен Д. А. Субетто за всестороннюю поддержку, А. В. Лудиковой за неоценимую помощь и всем участникам полевых и лабораторных работ, без которых эти исследования не могли бы состояться. В разные годы в экспедиционных работах по отбору колонок на Карельском перешейке, Ладожском озере и Белом море принимали участие О. Б. Аверичкин, Н. Н. Андреева, Т. Алениус, М. А. Анисимов, Н. Н. Верзилин, Т. Ю. Газизова, Д. В. Герасимов, И. М. Греков, П. М. Долуханов, Е. С. Дудоркин, С. Г. Каретников, Е. М. Колпаков, В. В. Колька, Н. Ю. Корнеев, Ю. А. Кублицкий, А. М. Кульков, М. А. Кулькова, П. А. Леонтьев, А. И. Мурашкин, М. А. Науменко, А. В. Орлов, М. В. Павлов, Н. В. Политова, М. С. Потахин, Т. В. Сапелко, Д. В. Севастьянов, А. О. Смоленский, Г. Д. Субетто, Л. С. Сырых, А. В. Терехов, Д. С. Толстобров, А. Н. Толстоброва, А. Е. Шаталова, К. В. Шеманаев, М. А. Юшкова и многие другие.

Литература

70 лет Институту озероведения РАН / Отв. ред. В. А. Румянцев, И. С. Трифонова. СПб.: Свое издательство, 2017. 252 с.

Квасов Д. Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.

Колька В., Евзеров В., Меллер Я., Корнер Д. Последледниковые гляциоизостатические движения на северо-востоке Балтийского щита // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Кольского полуострова. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. С. 15–25.

Колька В. В., Корсакова О. П. Положение береговой линии Белого моря и неотектонические движения северо-востока Фенноскандии в позднеледниковье и голоцене // Система Белого моря. Т. IV: Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. С. 222–249.

Кошечкин Б. И., Экман И. М. Голоценовые трансгрессии Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб.: Изд-во РГО, 1993. С. 49–60.

Кузнецов Д. Д. О повторяемости результатов аналитических исследований колонок озерных отложений из разных частей озера // Динамика экосистем в голоцене: Мат-лы V Всерос. науч. конф. с международным участием (к 100-летию Л. Г. Динесмана). М.: Медиа-ПРЕСС, 2019. С. 168–170.

Кузнецов Д. Д., Лудикова А. В., Субетто Д. А., Герасимов Д. В., Тараканов А. С., Бутов И. И. Стратиграфические особенности озерных отложений внутренних озер островов северной части Ладожского озера на примере озера Святого Сергия (остров Путсари) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2023. Вып. 10. С. 369–376. doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-369-376

Кузнецов Д. Д., Лудикова А. В., Субетто Д. А., Леонтьев П. А., Греков И. М., Потахин М. С., Сапелко Т. В., Сырых Л. С., Толстобров Д. С. Хроно- и литостратиграфия озерных отложений острова Анзер (Соловецкие острова) в контексте послеледниковой истории Белого моря // Известия РАН. Сер. геогр. 2022а. Т. 86, № 6. С. 70–88. doi: 10.31857/S2587556622060085

Кузнецов Д. Д., Лудикова А. В., Субетто Д. А., Сапелко Т. В. Голоценовое осадконакопление в Ладожском озере – результаты экспедиционных работ последних лет // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Вып. 8. С. 339–342. doi: 10.24412/2687-1092-2021-8-339-342

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А. Голоценовое накопление органического вещества в донных отложениях Ладожского озера // Геоморфология. 2021. Т. 52, № 2. С. 63–71. doi: 10.31857/S043542812102005X

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Леонтьев П. А. Органическое осадконакопление в малых озерах Беломорского бассейна в голоцене // Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология: Мат-лы Всерос. науч. конф. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. С. 74–79.

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Лудикова А. В., Орлов А. В., Шаталова А. Е., Дудоркин Е. С., Тумская В. В. Новые сведения об отложениях Гейниокского пролива (Карельский перешеек) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. № 7. С. 318–321. doi: 10.24411/2687-1092-2020-10751

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Лудикова А. В. Особенности голоценового осадконакопления в малых озерах Южного Приладожья // Вестник СПбГУ (в печати).

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Лудикова А. В. Соединение Ладожского озера с Балтийским морем в позднем голоцене – новые палеолимнологические данные // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022б. Т. 506, № 1. С. 111–116. doi: 10.31857/S2686739722600746

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Сапелко Т. В., Лудикова А. В. Гидрографическая сеть северной части Карельского перешейка в голоцене по данным о строении отложений малых озер // Геоморфология. 2015. № 1. С. 54–69. doi: 10.15356/0435-4281-2015-1-54-69

Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А. Стратиграфия донных отложений озер Карельского перешейка. М.: ГЕОС, 2019. 120 с.

Леонтьев П. А., Греков И. М., Субетто Д. А., Кузнецов Д. Д., Колька В. В., Лудикова А. В., Потахин М. С., Сапелко Т. В., Сырых Л. С., Толстобров Д. С. Стратиграфия озерных отложений Онежского полуострова, Белое море // Общество. Среда. Развитие. 2016. № 3. С. 125–129.

Леонтьев П. А., Субетто Д. А., Репкина Т. Ю., Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Кублицкий Ю. А., Сапелко Т. В., Зарецкая Н. Е., Фирсенкова В. М., Потахин М. С., Сырых Л. С., Толстобров Д. С. Реконструкция относительного перемещения уровня моря в голоцене на северо-западе Онежского полуострова (губа Конюхова, Белое море) на основе палеолимнологических исследований // Известия РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86, № 6. С. 89–101. doi: 10.31857/S2587556622060097

Лудикова А. В. Свидетельства среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера по данным диатомового анализа // Известия РГО. 2015. Т. 147, вып. 4. С. 38–51.

Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Сапелко Т. В. Использование метода «изоляционных бассейнов» при реконструкции изменений уровня Ладожского озера // Всероссийская конференция по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум): Сб. науч. трудов конф. СПб.: Лемма, 2016. С. 247–253.

Лудикова А. В., Субетто Д. А., Давыдова Н. Н., Сапелко Т. В., Арсланов Х. А. Колебания уровня Ладожского озера в голоцене (на основе палеолимнологических исследований оз. Святого Сергия на о. Путсаари) // Известия РГО. 2005. Т. 137, вып. 6. С. 34–41.

Малаховский Д. Б., Арсланов Х. А., Гей Н. А., Джиноридзе Р. Н., Козырева М. Г. Новые данные по голоценовой истории Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб.: Изд-во РГО, 1993. С. 61–73.

Сапелко Т. В., Газизова Т. Ю., Моисеенко А. Д., Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Русанов А. Г. Особенности процесса изоляции озера Витальевского (остров Валаам) и динамика растительности в связи с изменением уровня Ладожского озера в позднем голоцене // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54, № 4. С. 72–89. doi: 10.31857/S2949178923040126

Сапелко Т. В., Кузнецов Д. Д., Корнеевкова Н. Ю., Денисенков В. П., Лудикова А. В. Палеолимнология внутренних озер острова Путсаари (Ладожское озеро) // Известия РГО. 2014. Т. 146, вып. 3. С. 29–40.

Сапелко Т. В., Кузнецов Д. Д., Лудикова А. В., Колпаков Е. М., Шумкин В. Я. История озера Канозеро в позднеледниковье и голоцене на юге Кольского полуострова (северо-запад России) // Геоморфология. 2022. Т. 53, № 3. С. 29–38. doi: 10.31857/S0435428122030154

Семенович Н. И. Донные отложения Ладожского озера. М.-Л.: Наука, 1966. 124 с.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 343 с.

Субетто Д. А. Палеолимнологические реконструкции в бассейне Белого моря // Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Научный мир, 2010. С. 247–265.

Субетто Д. А., Аверичкин О. Б., Кузнецов Д. Д. Расчеты палеостока по Балтийско-Ладожскому соединению в северной части Карельского перешейка // Известия РГО. 2009. Вып. 5. С. 37–51.

Субетто Д. А., Шевченко В. П., Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Сапелко Т. В., Лисицын А. П., Евзеров В. Я., ван Беек П., Суо М., Субетто Г. Д. Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // ДАН. 2012. Т. 446, № 2. С. 183–190. doi: 10.1134/S1028334X12090140

Alenius T., Gerasimov D., Sapelko T., Ludikova A., Kuznetsov D., Golyeva A., Nordqvist K. Human-environment interaction during the Holocene along the shoreline of the Ancient Lake Ladoga: A case study based on palaeoecological and archaeological material from the Karelian Isthmus, Russia // The Holocene. 2020. Vol. 30, 11. P. 1622–1636. doi: 10.1177/0959683620941071

Dolukhanov P. M., Shukurov A. M., Arslanov Kh. A., Subetto D. A., Zaitseva G. I., Djinnoridze E. I., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savellieva L. A. Evolution of waterways and early human settlements in the eastern Baltic area: radiocarbon-based chronology // Radiocarbon. 2007. Vol. 49, no. 2. P. 527–542. doi: 10.1017/S0033822200042442

Dolukhanov P. M., Subetto D. A., Arslanov Kh. A., Davydova N. N., Zaitseva G. I., Djinnoridze E. N., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savellieva L. A. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia // Quat. Int. 2009. Vol. 203. P. 33–51. doi: 10.1016/j.quaint.2008.04.021

Kuznetsov D. D. Organic matter content dynamics in lake sediment cores of European Russia and Holocene climatic changes // Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, methodology, current status: Proceedings of the international conference. Yakutsk: North-Eastern Federal University, 2016. P. 146–149.

Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Subetto D. A., Kublitsky Yu. A., Leontev P. A., Potakhin M. S. Lake sediments of the Kindo Peninsula and its surroundings (Karelian coast of the White Sea) – Holocene stratigraphy and dynamics of organic accumulation // Limnology and Freshwater Biology. 2022. No. 4. P. 1456–1458. doi: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1456

Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Subetto D. A. Patterns of organic lacustrine sedimentation in surroundings of Lake Ladoga and palaeogeographical background // Limnology and Freshwater Biology. 2020. No. 4. P. 488–489. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-488

Ludikova A. V., Sapelko T. V., Kuznetsov D. D. On the marine limit on the Kandalaksha Coast, the White Sea: new data from Lake Kanozero, a huge isolation basin in the middle course of the River Umba // Limnology and Freshwater Biology. 2022. No. 4. P. 1473–1475. doi: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1473

Ludikova A. V., Sapelko T. V., Kuznetsov D. D., Shikhirina K. A. Sediment record of the earliest stage of the evolution of Lake Kanozero (SW Kola Peninsula): new data for regional deglaciation reconstructions and relative sea-level studies // Геоморфология и палеогеография. 2023а. Т. 54, № 4. С. 90–104. doi: 10.31857/S2949178923040059

Ludikova A. V., Subetto D. A., Andreev A. A., Gromig R., Fedorov G., Melles M. The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? // J. Paleolimnol. 2021. Vol. 65. P. 85–99. doi: 10.1007/s10933-020-00150-0

Ludikova A. V., Subetto D. A., Kuznetsov D. D., Sapelko T. V. From a large basin to a small lake: Siliceous microfossils stratigraphy of the isolation basins on Big Solovetskiy Island (the White Sea, NW Russia) and its implication for paleoreconstructions // Quat. Int. 2023b. Vol. 644–645. P. 61–78. doi: 10.1016/j.quaint.2021.07.007

Ludikova A. V., Subetto D. A., Kuznetsov D. D., Orlov A. V., Shatalova A. E. New diatom and sedimentary data confirm the existence of the northern paleo-outlet from Lake Ladoga to the Baltic Sea // Quaternary. 2024. Vol. 7. Art. 31. doi: 10.3390/quat7030031

Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 205–215. doi: 10.1007/BF00031829

Saarnisto M. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia // Quat. Int. 2012. No. 260. P. 143–152. doi: 10.1016/j.quaint.2011.09.005

Sapelko T. V., Ignatyeva N. V., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Guseva M. A., Revunova A. V., Zazovskaya E. P., Pozdnyakov Sh. R. Natural and anthropogenic impacts on Lake Ladoga and its catchment area through the late glacial and Holocene according to a new paleolimnological record // J. Paleolimnol. 2024. Vol. 72. P. 241–259. doi: 10.1007/s10933-024-00329-9

Sapelko T., Pozdnyakov S., Kuznetsov D., Ludikova A., Ivanova E., Guseva M., Zazovskaya E. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga // Quat. Int. 2019. Vol. 524. P. 67–75. doi: 10.1016/j.quaint.2019.05.028

Subetto D. A., Davydova N. N., Rybalko A. E. Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 1998. Vol. 140(1). P. 113–119. doi: 10.1016/S0031-0182(98)00032-7

References

Alenius T., Gerasimov D., Sapelko T., Ludikova A., Kuznetsov D., Golyeva A., Nordqvist K. Human-environment interaction during the Holocene along the shoreline of the Ancient Lake Ladoga: A case study based on palaeoecological and archaeological material from the Karelian Isthmus, Russia. *The Holocene*. 2020;30(11): 1622–1636. doi: 10.1177/0959683620941071

Dolukhanov P. M., Shukurov A. M., Arslanov Kh. A., Subetto D. A., Zaitseva G. I., Djinoridze E. I., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savelieva L. A. Evolution of waterways and early human settlements

in the eastern Baltic area: radiocarbon-based chronology. *Radiocarbon*. 2007;49(2):527–542. doi: 10.1017/S0033822200042442

Dolukhanov P. M., Subetto D. A., Arslanov Kh. A., Davydova N. N., Zaitseva G. I., Djinoridze E. N., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savelieva L. A. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia. *Quat. Int.* 2009;203:33–51. doi: 10.1016/j.quaint.2008.04.021

Kolka V., Evzerov V., Møller J., Corner G. Post-glacial glacioisostatic movements in the northeast of the Baltic Shield. *New data on the geology and minerals of the Kola Peninsula*. Apatity: KSC RAS; 2005. P. 15–25. (In Russ.)

Kolka V. V., Korsakova O. P. Position of the White Sea coastline and neotectonic movements of the northeast of Fennoscandia in the Late Glacial and Holocene. *The White Sea system. Vol. IV. The processes of sedimentation, geology and history*. Moscow: Nauchnyi mir; 2017. P. 222–249. (In Russ.)

Koshechkin B. I., Ekman I. M. Holocene transgressions of Lake Ladoga. *Evolution of natural environments and the current state of the geosystem of Lake Ladoga*. St. Petersburg: RGO; 1993. P. 49–60. (In Russ.)

Kuznetsov D. D. On the repeatability of the analytical studies results of lake sediment cores from different parts of the lake. *Dynamics of ecosystems in the Holocene*. Moscow: Media-Press; 2019. P. 168–170. (In Russ.)

Kuznetsov D. D. Organic matter content dynamics in lake sediment cores of European Russia and Holocene climatic changes. *Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, methodology, current status: Proceedings of the international conference*. Yakutsk: North-Eastern Federal University; 2016. P. 146–149. (In Russ.)

Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Subetto D. A., Gerasimov D. V., Tarakanov A. S., Butov I. I. Stratigraphic features of lake sediments of inland lakes of the islands in the northern part of Lake Ladoga on the example of Lake St. Sergius (Putsaari Island). *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2023;10:369–376. (In Russ.). doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-369-376

Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Subetto D. A., Kublitsky Yu. A., Leontev P. A., Potakhin M. S. Lake sediments of the Kindo Peninsula and its surroundings (Karelian coast of the White Sea) – Holocene stratigraphy and dynamics of organic accumulation. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022;4:1456–1458. doi: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1456

Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Subetto D. A., Leont'ev P. A., Grekov I. M., Potakhin M. S., Sapelko T. V., Strykh L. S., Tolstobrov D. S. Chrono- and lithostratigraphy of lake sediments of Anzer Island (Solovetsky Islands) in the context of the post-glacial history of the White Sea. *Izvestiya RAN. Ser. Geogr.* 2022;86(6): 70–88. (In Russ.). doi: 10.31857/S2587556622060085

Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Subetto D. A. Patterns of organic lacustrine sedimentation in surroundings of Lake Ladoga and palaeogeographical background. *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;4:488–489. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-488

Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Subetto D. A., Sapelko T. V. Holocene sedimentation in Lake Ladoga –

results of the expedition works in recent years. *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2021;8:339–342. (In Russ.). doi: 10.24412/2687-1092-2021-8-339-342

Kuznetsov D. D., Subetto D. A. Holocene organic sedimentation in Lake Ladoga. *Geomorfologiya = Geomorphology*. 2021;52(2):63–71. (In Russ.). doi: 10.31857/S043542812102005X

Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Leont'ev P. A. Organic sedimentation in small lakes of the White Sea basin in the Holocene. *Late and postglacial history of the White Sea: Geology, tectonics, sedimentary settings, chronology: Proceedings of the All-Russian scientific conference*. Moscow: KDU, Universitetskaya kniga; 2018. P. 74–79. (In Russ.)

Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Ludikova A. V., Orlov A. V., Shatalova A. E., Dudorkin E. S., Tumskeya V. V. New data on sediments in the Heinjoki strait (Karelian Isthmus). *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2020;7:318–321. (In Russ.). doi: 10.24411/2687-1092-2020-10751

Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Ludikova A. V. Specifics of the Holocene sedimentation in small lakes of the southern Lake Ladoga region. *Vestnik of Saint-Petersburg University* (in press). (In Russ.)

Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Sapelko T. V., Ludikova A. V. Hydrographic network of the northern part of the Karelian Isthmus in the Holocene according to the sediments in the small lakes. *Geomorfologiya = Geomorphology*. 2015;1:54–69. (In Russ.). doi: 10.15356/0435-4281-2015-1-54-69

Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Ludikova A. V. The connection between Lake Ladoga and the Baltic Sea in the Late Holocene: New paleolimnological data. *Doklady Earth Sciences*. 2022;506(1):693–697. doi: 10.1134/S1028334X22700076

Kuznetsov D. D., Subetto D. A. Stratigraphy of lake sediments of the Karelian Isthmus. Moscow: Geos; 2019. 120 p. (In Russ.)

Kvasov D. D. Late Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe. Leningrad: Nauka; 1975. 278 p. (In Russ.)

Leont'ev P. A., Grekov I. M., Subetto D. A., Kuznetsov D. D., Kolka V. V., Ludikova A. V., Potakhin M. S., Sapelko T. V., Syrykh L. S., Tolstobrov D. S. Stratigraphy of lake sediments of the Onega Peninsula, White Sea. *Obschestvo. Sreda. Razvitie = Society. Environment. Development*. 2016;3:125–129. (In Russ.)

Leont'ev P. A., Subetto D. A., Repkina T. Yu., Ludikova A. V., Kuznetsov D. D., Kublitskii Yu. A., Sapelko T. V., Zaretskaya N. E., Firsenkova V. M., Potakhin M. S., Syrykh L. S., Tolstobrov D. S. Holocene relative sea-level changes reconstruction in the North-West of the Onega Peninsula (Konyukhov Bay, White Sea) based on paleolimnological studies. *Izvestiya RAN. Ser. Geogr.* 2022;86(6):89–101. (In Russ.). doi: 10.31857/S2587556622060097

Ludikova A. V. Diatom evidences for the mid-Holocene Lake Ladoga transgression. *Izvestia RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2015;147(4):38–51. (In Russ.)

Ludikova A. V., Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Sapelko T. V. Using the 'isolation basins' method in

reconstructing changes in the level of Lake Ladoga. *All-Russian conference on large inland reservoirs (V Ladoga symposium)*. St. Petersburg: Lemma, 2016. P. 247–253. (In Russ.)

Ludikova A. V., Sapelko T. V., Kuznetsov D. D. On the marine limit on the Kandalaksha Coast, the White Sea: new data from Lake Kanozero, a huge isolation basin in the middle course of the River Umba. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022;4:1473–1475. doi: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1473

Ludikova A. V., Sapelko T. V., Kuznetsov D. D., Shikhirina K. A. Sediment record of the earliest stage of the evolution of Lake Kanozero (SW Kola Peninsula): new data for regional deglaciation reconstructions and relative sea-level studies. *Geomorfologiya i Paleogeografiya = Geomorphology and Paleogeography*. 2023;54(4): 90–104. doi: 10.31857/S2949178923040059

Ludikova A. V., Subetto D. A., Andreev A. A., Gromig R., Fedorov G., Melles M. The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? *J. Paleolimnol.* 2021;65:85–99. doi: 10.1007/s10933-020-00150-0

Ludikova A. V., Subetto D. A., Davydova N. N., Sapelko T. V., Arslanov Kh. A. Lake Ladoga level fluctuations in the Holocene (based on paleolimnological studies of Lake St. Sergius on Putsaari Island). *Izvestia RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2005;137(6):34–41. (In Russ.)

Ludikova A. V., Subetto D. A., Kuznetsov D. D., Orlov A. V., Shatalova A. E. New diatom and sedimentary data confirm the existence of the northern paleo-outlet from Lake Ladoga to the Baltic Sea. *Quaternary*. 2024;7:31. doi: 10.3390/quat7030031

Ludikova A. V., Subetto D. A., Kuznetsov D. D., Sapelko T. V. From a large basin to a small lake: Siliceous microfossils stratigraphy of the isolation basins on Big Solovetskiy Island (the White Sea, NW Russia) and its implication for paleoreconstructions. *Quat. Int.* 2023;644–645:61–78. doi: 10.1016/j.quaint.2021.07.007

Malakhovskii D. B., Arslanov Kh. A., Gey N. A., Dzhinoridze R. N., Kozyreva M. G. New data on the Holocene history of Lake Ladoga. *Evolution of natural environments and the current state of the geosystem of Lake Ladoga*. St. Petersburg: RGO; 1993. P. 61–73. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Trifonova I. S. (eds.). 70 years of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg: Svoe izdatelstvo; 2017. 252 p. (In Russ.)

Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari. *Hydrobiologia = Hydrobiology*. 1996;322:205–215. doi: 10.1007/BF00031829

Saarnisto M. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia. *Quat. Int.* 2012;260:143–152. doi: 10.1016/j.quaint.2011.09.005

Sapelko T. V., Gazizova T. Yu., Moiseenko A. D., Ludikova A. V., Kuznetsov D. D., Rusanov A. G. Lake Vitalievskoye (Valaam Island) isolation process and vegetation dynamics due to the changes in the level of Lake Ladoga during the Late Holocene. *Geomorfologiya i Paleogeografiya = Geomorphology and Paleogeography*

graphy. 2023;54(4):72–89. (In Russ.). doi: 10.31857/S2949178923040126

Sapelko T. V., Ignatyeva N. V., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Guseva M. A., Revunova A. V., Zazovskaya E. P., Pozdnyakov Sh. R. Natural and anthropogenic impacts on Lake Ladoga and its catchment area through the late glacial and Holocene according to a new paleolimnological record. *J. Paleolimnol.* 2024;72:241–259. doi: 10.1007/s10933-024-00329-9

Sapelko T. V., Kuznetsov D. D., Korneenkova N. Yu., Denisikov V. P., Ludikova A. V. Paleolimnology of inland lakes of Putsaari Island (Lake Ladoga). *Izvestia RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society.* 2014;146(3):29–40. (In Russ.)

Sapelko T. V., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Kolpakov E. M., Shumkin V. Ya. Late Glacial – Holocene history of Lake Kanozero in the southern Kola Peninsula, Northwestern Russia. *Geomorfologiya = Geomorphology.* 2022;53(3):29–38. (In Russ.). doi: 10.31857/S0435428122030154

Sapelko T., Pozdnyakov S., Kuznetsov D., Ludikova A., Ivanova E., Guseva M., Zazovskaya E. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga. *Quat. Int.* 2019;524:67–75. doi: 10.1016/j.quaint.2019.05.028

Semenovich N. I. Bottom sediments of Lake Ladoga. Moscow-Leningrad: Nauka; 1966. 124 p. (In Russ.)

Subetto D. A. Lake sediments: paleolimnological reconstructions. St. Petersburg: Herzen University; 2009. 343 p. (In Russ.)

Subetto D. A. Paleolimnological reconstructions in the White Sea basin. *The White Sea system.* Vol. I. Moscow: Nauchnyi mir; 2010. P. 247–265. (In Russ.)

Subetto D. A., Averichkin O. B., Kuznetsov D. D. Paleoflow calculations for the Baltic-Ladoga connection in the northern part of the Karelian Isthmus. *Izvestia RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society.* 2009;5:37–51. (In Russ.)

Subetto D. A., Davydova N. N., Rybalko A. E. Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1998;140(1):113–119. doi: 10.1016/S0031-0182(98)00032-7

Subetto D. A., Shevchenko V. P., Ludikova A. V., Kuznetsov D. D., Sapelko T. V., Lisitsyn A. P., Evzerov V. Ya., van Beek P., Suo M., Subetto G. D. Chronology of isolation of the Solovetskii Archipelago lakes and current rates of lake sedimentation. *Doklady Earth Sciences.* 2012;446:1042–1048. doi: 10.1134/S1028334X12090140

Поступила в редакцию / received: 25.04.2024; принята к публикации / accepted: 04.06.2024.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Кузнецов Денис Дмитриевич

канд. геогр. наук, научный сотрудник

e-mail: dd_kuznetsov@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Kuznetsov, Denis

Cand. Sci. (Geog.), Researcher

УДК 574.5 + 551.8

60 ЛЕТ ИЗУЧЕНИЯ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА. ЧТО НОВОГО МОЖНО СКАЗАТЬ ОБ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ КРУПНЕЙШЕГО ВОДОЕМА ЕВРОПЫ?

А. В. Лудикова

Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105)

Целенаправленное и систематическое изучение диатомовых водорослей в донных осадках Ладожского озера началось в конце 50-х годов XX века в рамках работ Комплексной ладожской экспедиции Института озероведения РАН. Основные направления изучения диатомовых водорослей в ладожских отложениях были определены и на протяжении большей части рассматриваемого периода развивались д. б. н. Натальей Наумовной Давыдовой (1931–2014). Ею изучен систематический и эколого-географический состав диатомовых водорослей в поверхностном слое и колонках донных отложений, охарактеризованы основные этапы развития Ладожского озера в позднеледниковье-голоцене по данным диатомового анализа, прослежены стадии трансформации озерной экосистемы под воздействием антропогенного фактора, заложены основы геоэкологического мониторинга с использованием субфоссильных диатомовых комплексов. В настоящее время изучение диатомовых водорослей в ладожских отложениях продолжается по следующим направлениям: 1) получение новых данных и уточнение существующих представлений об основных этапах эволюции Ладожского озера и выявление биоиндикационных признаков изменений состояния ладожской экосистемы в геологическом прошлом; 2) продолжение ряда мониторинговых наблюдений за изменениями состава диатомовых комплексов в поверхностных осадках с целью изучения состояния Ладожского озера на современном этапе; 3) изучение отложений малых озер Приладожья с использованием модифицированного метода изоляционных бассейнов для реконструкции пространственно-временных рамок трансгрессивных стадий Ладожского озера.

Ключевые слова: диатомовый анализ; озерные осадки; палеолимнология; Ладожское озеро; история исследования

Для цитирования: Лудикова А. В. 60 лет изучения диатомовых водорослей в донных отложениях Ладожского озера. Что нового можно сказать об истории развития и современном состоянии крупнейшего водоема Европы? // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 128–142. doi: 10.17076/lim1909

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (FFZF-2024-0001).

A. V. Ludikova. 60 YEARS OF STUDYING SEDIMENTARY DIATOMS IN LAKE LADOGA. WHAT NEW CAN BE REPORTED ABOUT THE EVOLUTION AND THE CURRENT STATE OF THE LARGEST EUROPEAN LAKE?

*Institute of Limnology, St. Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences
(9 Sevastjanova St., 196105 St. Petersburg, Russia)*

Targeted and regular studies of diatoms in the sediments of Lake Ladoga started in the late 1950s as part of the work of the Integrated Ladoga Expedition of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. The main directions of studying diatoms in Ladoga sediments were outlined and developed during the major part of the reviewed period by Dr. Natalia N. Davydova (1931–2014). She studied the systematic, ecological, and geographical composition of diatoms in the surface sediments and sediment cores retrieved from the Ladoga bottom, described the main stages of Lake Ladoga evolution in the Late Glacial-Holocene period based on diatom analysis, traced the stages in the lake ecosystem transformation under human impact, laid the foundations for geoecological monitoring using subfossil diatom assemblages. Current research on diatoms in Ladoga sediments focuses on the following: 1) obtaining new data and updating existing ideas about the main stages in the evolution of Lake Ladoga, and revealing bioindication signals of Ladoga ecosystem changes in the geological past; 2) continuing the series of monitoring observations of changes in the composition of surface-sediment diatom assemblages to assess the present state of Lake Ladoga; 3) studying the Ladoga sediments in small-lake basins in the Ladoga region using a modified isolation-basin approach to reconstruct the spatial and temporal frames of transgressive stages of Lake Ladoga.

Keywords: diatom analysis; lake sediments; paleolimnology; Lake Ladoga; research history

For citation: Ludikova A. V. 60 years of studying sedimentary diatoms in Lake Ladoga. What new can be reported about the evolution and the current state of the largest European lake? *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 128–142. doi: 10.17076/lim1909

Funding. The study contributes to the State Research Program of the Institute of Limnology RAS – SPC RAS (FFZF-2024-0001).

Введение

Диатомовые водоросли традиционно являются наиболее широко используемой группой индикаторных организмов для изучения эволюции озерных экосистем и оценки их современного состояния. Благодаря кремнистым панцирям диатомовые водоросли хорошо сохраняются в донных осадках, что позволяет изучать видовой состав диатомовых комплексов прошлого и его изменения во времени. Кроме того, диатомовые водоросли имеют широкое географическое распространение, способны обитать в большом диапазоне экологических условий, имеют детально разработанную систематику и установленные для большинства видов четкие экологические предпочтения и специфические требования к различным параметрам водной среды. Все это делает их надежными индикаторами изменений этих параметров, что позволяет реконструировать основные этапы эволюции озерных экосистем, судить о скорости и направленности происходящих в них процессов.

Первые данные о видовом составе диатомовых водорослей в донных отложениях Ладожского озера относятся ко второй половине XIX – началу XX в. [напр., Ульский, 1864; Гильзен, 1905; Скориков, 1905]. Однако эти сведения носили ограниченный характер и исчерпывались списками видов диатомей, определенных в немногих случайно взятых образцах грунта. Во 2-й половине 1950-х годов были опубликованы результаты изучения межледниковых отложений в котловине Ладожского озера, содержащих богатый комплекс морских диатомей [Черемисинова, 1957].

Начало всестороннего изучения диатомовых комплексов в ладожских осадках связано с созданием в 1956 г. на базе Лаборатории озероведения (впоследствии Института озероведения РАН) Комплексной ладожской экспедиции под руководством Н. И. Семеновича – лимнолога, гидрохимика, крупнейшего специалиста по донным отложениям озер. Выполнение диатомового анализа было поручено молодой сотруднице возглавляемой Н. И. Семеновичем

группы по изучению донных отложений Н. Н. Давыдовой (1931–2014), впоследствии выдающемуся специалисту-диатомологу и палеолимнологу, доктору биологических наук. Первые масштабные работы по пробоотбору и изучению состава диатомовых комплексов из поверхностного слоя донных отложений (субфоссильных диатомовых комплексов), запланированные как первый этап исследования диатомовых водорослей в ладожских осадках, были проведены в 1958–1960-х годах [Давыдова, 1961а, б, 1968а]. В 1960-х годах выполнены также первые палеолимнологические исследования Ладожского озера с применением диатомового анализа колонок донных отложений, отобранных в различных частях озерной котловины [Давыдова, 1965; Абрамова, Давыдова, 1966; Абрамова и др., 1967]. В последующие годы продолжилось изучение диатомовых комплексов из колонок и поверхностного слоя донных отложений, имеющее целью установление особенностей видового состава диатомей в различные климатические эпохи, выявление трансформаций диатомовых комплексов под влиянием природных и антропогенных факторов [напр., Давыдова, 1985, 1990; Давыдова, Субетто, 2000].

В настоящее время изучение диатомовых водорослей в ладожских осадках продолжается по следующим направлениям: 1) получение новых данных и уточнение существующих представлений об основных этапах эволюции Ладожского озера и выявление биоиндикационных признаков изменений состояния ладожской экосистемы в геологическом прошлом; 2) продолжение ряда мониторинговых наблюдений за изменениями состава диатомовых комплексов в поверхностных осадках с целью изучения состояния Ладожского озера на современном этапе; 3) изучение отложений малых озер Приладожья с использованием модифицированного метода изоляционных бассейнов для реконструкции пространственно-временных рамок трансгрессивных стадий Ладожского озера.

Материалы и методы

С конца 1950-х годов по настоящее время техника пробоотбора и пробоподготовки и способы представления результатов диатомового анализа претерпели некоторые изменения.

Пробоотбор поверхностного слоя донных отложений в конце 1950-х – начале 1960-х годов выполнялся с использованием ударного стратометра Перфильева [Давыдова, 1968а], впоследствии – с помощью дночерпателя Экмана-

Берджа, из которого на диатомовый анализ отбирали верхний жидкий, неконсолидированный слой осадка – наилок [Давыдова, 1985; Ludikova, 2021].

Отбор колонок донных отложений в конце 1950-х – начале 1960-х годов также осуществлялся с помощью стратометра Перфильева, позволявшего отбирать осадок мощностью до 1 м [Семенович, 1966; Абрамова и др., 1967; Давыдова, 1968б], в дальнейшем использовались 1,5-метровые грунтовые трубки системы ГОИН [Давыдова, 1985; Sapelko et al., 2019], 4-метровые ударные трубки системы ВСЕГЕИ [Давыдова, 1985; Давыдова и др., 1986], буровая установка UWITEC [Andreev et al., 2019].

Пробоподготовка выполняется по стандартным методикам – с использованием H_2O_2 [Давыдова, 1985] или $Na_4P_2O_7 \times 10H_2O$ [Жузе и др., 1974]. Образцы наилка берутся естественной влажности. Пробы из колонок донных отложений предварительно высушиваются при комнатной температуре и взвешиваются для последующего расчета концентрации створок диатомей в 1 г сухого вещества [Давыдова, 1985]. Для приготовления постоянных препаратов применяется среда Эльяшева (показатель преломления $n = 1,67–1,68$).

Аналитический этап. Подсчет и определение створок диатомовых водорослей выполняются с масляной иммерсией при увеличении $\times 90$, в настоящее время – $\times 100$, с использованием отечественных и зарубежных определителей. В настоящее время подсчет створок диатомей сопровождается количественным учетом других кремнистых микрофоссилий – цист золотистых водорослей (Chrysophyceae, хризифитов). Затем рассчитываются концентрации цист в 1 г сухого осадка, а также отношение «цисты : диатомеи» (отношение количества цист хризифитов, подсчитанных в пробе, к сумме цист и панцирей диатомей (1 панцирь = 2 створки), выраженное в процентах [Smol, 1985].

Представление результатов диатомового анализа. В ранних исследованиях [Давыдова, 1961а, б, 1968а, б] использовалась полуколичественная оценка роли отдельных видов в составе диатомовых комплексов, основанная на 6-балльной шкале обилия. Содержание створок данного вида в препарате/ряду препарата оценивалось в баллах, что позволяло затем подразделять их на единичные (≤ 2 балла), обильные (3 балла) и массовые (≥ 4 балла). Среди последних виды с обилием 6 баллов считались доминирующими, с обилием 5 баллов – субдоминантами.

Использование количественной методики оценки роли отдельного таксона в составе

диатомовых комплексов подразумевает расчет его абсолютного или относительного содержания. Количественная методика для представления результатов диатомового анализа стала применяться начиная с 1970-х годов. Использовались данные об абсолютном содержании (концентрации) отдельных видов и общем содержании створок в 1 г сухого осадка. Расчет концентрации выполнялся по формуле, учитывающей сухой вес пробы перед началом пробоподготовки, объем воды, добавленной к осадку при изготовлении препарата, число просмотренных полей зрения и подсчитанных в них створок и т. д. [Давыдова, 1985]. На диатомовых диаграммах отображались изменения концентраций отдельных таксонов, а также общего содержания створок в осадках.

В настоящее время для представления результатов диатомового анализа преимущественно используются данные об относительном (процентном) содержании таксона(-ов) в составе диатомовых комплексов, рассчитанном от числа подсчитанных в пробе створок. Согласно Н. Н. Давыдовой [1985], виды, доля которых составляет < 1 %, считаются единичными, от 1 до 5 % – обычными, > 5 % – массовыми (из них виды с численностью 5–10 % являются субдоминантами, а составляющие > 10 % створок – доминантами). Для оценки палеопродуктивности диатомовых сообществ, а также выявления роли терригенного разбавления в формировании донных отложений рассчитывается общая концентрация створок в осадках.

Результаты и обсуждение

Исследования 2-й половины XX в. Первые детальные сведения о систематическом составе диатомовых водорослей в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера, их экологической и фитогеографической характеристике получены в начале 1960-х годов [Давыдова, 1961а, б]. Материалом для изучения послужили пробы, отобранные на 139 станциях по всему дну ладожской котловины в 1957–1960 гг. Всего в изученных пробах обнаружено 226 таксонов диатомей рангом ниже рода, из них 4 были отмечены впервые для СССР и 94 – впервые для Ладожского озера [Давыдова, 1968а]. Среди массовых видов с наиболее высокой численностью (6 баллов по шкале обилия) выявлены *Melosira* (совр. *Aulacoseira*) *islandica*, *M. distans* var. *alpigena*, *M. italica* var. *italica*, *M. italica* ssp. *subarctica* (в настоящее время установлено, что указанные три таксона на самом деле являются тремя различными морфотипами *Aulacoseira subarctica*), *M. ambigua*,

Stephanodiscus astraea var. *astraea* (совр. *Stephanodiscus neoastraea*), *Tabellaria fenestrata* и *Asterionella formosa* [Давыдова, 1968а]. По отношению к солености было установлено преобладание олигогалобов-индифферентов, по биогеографической приуроченности – доминирование космополитных диатомей. Единичные находки створок морских видов в поверхностном слое донных осадков интерпретировались как результат их переотложения из морских межледниковых осадочных толщ. Выявлены закономерности распространения основных видов диатомей в поверхностных осадках, выполнено районирование Ладожского озера по составу диатомовых комплексов [Давыдова, 1961а, б, 1968а]. Кроме того, установлено, что состав танатоценозов диатомовых водорослей в целом соответствует видовому составу диатомей в пробах фитопланктона, а также показано, что количественные соотношения между массовыми видами диатомового планктона в основных чертах сохраняются в пробах из поверхностного слоя донных осадков [Давыдова, 1968а]. Это явилось важным выводом для последующего палеолимнологического изучения Ладожского озера.

В 1960-х годах на материалах изучения 19 колонок донных отложений, отобранных в разных частях озерной котловины, получены первые сведения о видовом, экологическом и фитогеографическом составе диатомовой флоры Ладожского озера начиная с позднеледниковья, что позволило охарактеризовать основные черты его развития [Абрамова, Давыдова, 1966; Абрамова и др., 1967]. В частности, было установлено, что после дегляциации в котловине Ладожского озера непрерывно существовал пресноводный водоем, убедительно показано, что присутствие отдельных створок морских и солоноватоводных диатомей не свидетельствует о проникновении морских вод в ладожскую котловину, а является следствием их переотложения из морских межледниковых осадков [Абрамова и др., 1967; Давыдова, 1968б]. Этот вывод имел большое значение в дискуссии о возможности существования в позднеледниковое время морского соединения между Балтийским и Белым морями через котловины Ладожского и Онежского озер и проникновения в голоцене вод литориновой трансгрессии Балтийского моря в ладожскую котловину. Доминирование истинно планктонных диатомей позволило сделать вывод о значительных глубинах ладожского бассейна на протяжении всей его послеледниковой истории. Кроме того, были предприняты первые попытки проследить связь между изменениями

состава диатомовых комплексов и сменой природно-климатических обстановок. В частности, показано, что отложения, накапливавшиеся в суровых климатических условиях позднеледниковья и раннего голоцена, содержат мало створок, а диатомовые комплексы характеризуются бедным видовым составом. В свою очередь, начиная с атлантического времени происходит резкое увеличение числа видов диатомей и их содержания в донных осадках. Тогда же отмечается значительное обогащение видового состава бентосных диатомей, однако их роль в составе диатомовых комплексов остается второстепенной [Давыдова, 1965, 1968б; Абрамова и др., 1967].

Эти и полученные в дальнейшем результаты позволили сделать вывод о том, что ядро современной диатомовой флоры было заложено уже в позднеледниковье [Давыдова, 1985]. Использование полуколичественной методики оценки численности отдельных таксонов в ранних исследованиях не позволило выявить существенных изменений в составе диатомовых комплексов в связи с природно-климатическими изменениями второй половины голоцена. Однако в дальнейшем сравнение данных об абсолютном содержании (концентрации в 1 г сухого осадка) отдельных видов и разновидностей диатомей показало, что в суббореальное время имело место изменение состава доминирующих таксонов, а также общее обогащение видового состава диатомовых комплексов [Давыдова, 1985]. Выявленные изменения, а также увеличение численности планктонных диатомей, зафиксированное в этот период в мелководных районах Ладожского озера, позволили выдвинуть предположение о связи их со среднеголоценовой трансгрессией Ладожского озера [Давыдова, 1990].

К началу 1990-х годов состав диатомовых комплексов, начиная с позднего дриаса, был изучен в 29 колонках донных отложений, отобранных в прибрежных и глубоководных районах Ладожского озера [Давыдова, 1990]. Основные закономерности изменения видового состава диатомовых комплексов прослежены и в дальнейших исследованиях [Davydova, 1990; Давыдова и др., 1993; Арсланов и др., 1996; Давыдова, 2002]. Это позволило охарактеризовать основные этапы развития Ладожского озера следующим образом. Обедненный диатомовый комплекс позднеледниковья в ладожской котловине унаследован от приледниковых озер, ранее существовавших у края отступавшего ледника. На протяжении всего периода дегляциации ладожской котловины (ок. 3 тыс. лет) водоем оставался низкопродуктивным,

олиготрофным. После спуска Балтийского ледникового озера, в состав которого входил ладожский бассейн, озеро стало развиваться изолированно. Находки переотложенных морских диатомей указывают на активизацию эрозионных процессов в связи с понижением его уровня. Низкое содержание створок в отложениях пребореального времени свидетельствует о том, что потепление климата раннего голоцена еще не сказалось на развитии экосистемы Ладожского озера. В этот период доминирует планктонная *Aulacoseira islandica*, происходит некоторое обогащение состава диатомовых комплексов планктонными видами, и по сей день обитающими в центральной части Ладожского озера. В бореальное время Ладожское озеро соединяется с существовавшим в балтийской котловине пресноводным Анциловым озером, о чем свидетельствует присутствие в составе диатомовых комплексов характерных анциловых видов (*Ellerbeckia arenaria*, *Eunotia clevei*). Улучшение климата в бореальное и атлантическое время, сопровождавшееся развитием почвенно-растительного покрова, стимулировало продукционные процессы в Ладожском озере, что нашло отражение в увеличении содержания диатомей в осадках и увеличении видового разнообразия. Подъем уровня озера в суббореальном периоде (ладожская трансгрессия) способствовал обогащению ладожских вод биогенными элементами в результате подтопления прибрежных низменностей, что привело к повышению продуктивности и увеличению видового разнообразия сообществ диатомовых водорослей. Появление планктонных *Aulacoseira alpigena* и *A. italica* (в современном понимании – морфотипы *A. subarctica*) в качестве со- и субдоминантов *A. islandica* ассоциируется с суббореальным похолоданием климата. В мелководных заливах трансгрессия нашла отражение в увеличении доли планктонных диатомей, тогда как в глубоководных районах их численность существенно не изменилась. Похолодание субатлантического времени привело к тому, что холодолюбивая *A. islandica* стала единственным доминантом в составе диатомовых комплексов, тогда как *A. alpigena* и *A. italica* являлись субдоминантами [Давыдова, Субетто, 2000; Давыдова, 2002].

Продолжение изучения диатомовых водорослей из поверхностного слоя донных осадков позволило проследить трансформацию ладожской экосистемы в результате антропогенного воздействия. Развитие хозяйственной деятельности по берегам и на водосборе Ладожского озера в конце 1960-х – начале 1980-х годов привело к увеличению фосфорной

нагрузки, обусловленной поступлением большого количества фосфорных соединений со стоками промышленных предприятий и сельхозугодий. Это, в свою очередь, повлекло существенные изменения состава субфоссильных диатомовых комплексов [Давыдова и др., 1997]. Так, к началу 1960-х годов состав диатомовых комплексов из поверхностного слоя донных осадков свидетельствовал об олиготрофном статусе Ладожского озера. Его основу составляли планктонные виды, характерные для крупных глубоководных олиготрофных бассейнов [Давыдова, 1968а; Давыдова и др., 1997]: *Aulacoseira islandica*, *A. alpigena* (в современном понимании один из морфотипов *A. subarctica*), *Asterionella formosa*, *Stephanodiscus neoastreae*, *Tabellaria fenestrata*.

В конце 1970-х годов численности доминантов в составе диатомовых комплексов достигают *Asterionella formosa* и *Diatoma tenuis*, массовому развитию которых благоприятствует повышение фосфорной нагрузки. Рост расчетных показателей сапробности также указывал на переход Ладожского озера из олигосапробной в мезосапробную зону [Давыдова, 1982, 1985; Davydova et al., 1994; Давыдова и др., 1997]. Это подтверждалось также материалами гидрохимических исследований: концентрация общего фосфора в воде Ладожского озера в 1976–1980 гг. в среднем составляла 26 мкг л⁻¹ [Расплетина, 1982]. При этом наиболее существенные изменения в составе диатомовых комплексов были отмечены в заливах южных притоков (в первую очередь р. Волхов), а также в северном шхерном районе, характеризующемся замедленным водообменом с основной частью озера. Несмотря на заметное снижение фосфорной нагрузки начиная со второй половины 1980-х годов, результаты изучения состава субфоссильных диатомовых комплексов в 1991–1994 гг. показали, что в открытой части озера по-прежнему высокую численность имели *Asterionella formosa* и *Diatoma tenuis*, а в заливах с замедленным водообменом с основной акваторией присутствовали такие индикаторы антропогенного эвтрофирования, как *Stephanodiscus hantzschii* и *Cyclostephanos dubius* [Slepukhina et al., 1996; Давыдова и др., 1997; Davydova et al., 1999].

Антропогенно обусловленные изменения состава диатомовых комплексов прослеживались также в верхних частях колонок донных отложений, отобранных в разных районах Ладожского озера. Было показано, что заливы со слабым водообменом с основной акваторией более подвержены антропогенному эвтрофированию по сравнению с открытой частью

озера [Давыдова и др., 1981, 1993; Давыдова, Трифонова, 1982; Давыдова, 1985].

Таким образом, продемонстрировано, что изменения состава субфоссильных диатомовых адекватно отражают процессы, происходящие в экосистеме Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования. Полученные результаты легли в основу концепции геоэкологического мониторинга Ладожского озера, разработанной совместно российскими и финскими исследователями при активном участии Н. Н. Давыдовой [Davydova et al., 2000]. В рамках концепции предусматривалось проведение диатомового анализа поверхностного слоя донных осадков на наиболее репрезентативных станциях с интервалом 1 раз в 10 лет, учитывая низкую скорость осадконакопления в Ладоге. Данный вид мониторинга является эффективным по временным и экономическим затратам и может использоваться как независимый способ оценки состояния ладожской экосистемы и его динамики.

Исследования XXI в. – современный этап. В настоящее время продолжается изучение диатомовых водорослей в колонках донных отложений Ладожского озера с целью **получения новых данных об основных этапах его эволюции в геологическом прошлом.** Позднеледниковые и голоценовые отложения имеют широкое распространение в ладожской котловине и потому достаточно хорошо изучены с точки зрения биостратиграфии. Более древние, доледниковые осадки в ладожской котловине перекрыты мореной поздневалдайского оледенения, что длительное время делало их недоступными для палеоолимологических исследований. До недавнего времени был известен единственный разрез доледниковых отложений, полученный в ходе геологического бурения в 1930-х годах, в котором под отложениями поздневалдайского оледенения были вскрыты газоносные глины, содержащие богатый комплекс морских диатомей [Черемисинова, 1957]. Находка в котловине Ладожского озера морских осадков с характерной диатомовой флорой, отмечавшейся ранее в геологических обнажениях и буровых скважинах на территории Приладожья и Ленинградской области, позволила говорить о существовании в эпоху Микулинского межледниковья морского соединения между Балтийским и Белым морями через ладожскую котловину. Однако сведения об условиях, установившихся в ладожском бассейне после завершения микулинской трансгрессии, отсутствовали.

В рамках российско-немецкого проекта PLOT был получен первый датированный

разрез позднемикулинских-ранневалдайских (~119–80 тыс. л. н.) отложений из котловины Ладожского озера [Andreev et al., 2019]. Диатомовый анализ выявил присутствие экологически несовместимых таксонов, среди которых наиболее многочисленными были солоноватоводно-морские *Chaetoceros* spp. и пресноводные *Aulacoseira islandica*. Отсутствие в составе диатомовых комплексов солоноватоводных диатомей позволило, однако, исключить условия распресненного морского залива или слабоосолоненного пресноводного бассейна, которые должны были бы благоприятствовать массовому развитию диатомей данной экологической группы. Доминирование планктонных диатомей и избирательная сохранность, проявившаяся в преобладании в обеих экологических группах створок видов, наиболее устойчивых к механическому разрушению, а также экземпляров определенного размерного диапазона, свидетельствовали в пользу аллохтонного происхождения диатомовых комплексов [Ludikova et al., 2021]. Избирательная сохранность способствовала также тому, что из > 150 таксонов, отмеченных в изученном разрезе, лишь несколько достигали численности > 1 %. Все это, а также низкое содержание створок диатомей и большое количество их фрагментов указывало на неблагоприятные условия для аккумуляции панцирей диатомовых водорослей. Отложения, содержащие подобные «смешанные» диатомовые комплексы и характеризующиеся низкими концентрациями створок, их плохой сохранностью и обедненным видовым составом, были ранее отмечены в многочисленных скважинах на территории Приладожья и Ленинградской области. Здесь они приурочены к слоям, формировавшимся после регрессии и опреснения микулинского морского бассейна, и датированы ранневалдайским временем [Лудикова, 2019]. Таким образом, полученные результаты позволили сделать вывод о том, что в конце микулинского – ранневалдайское время в ладожской котловине существовал пресноводный водоем, глубина, конфигурация и условия осадконакопления в котором существенно отличались от современных, а в формировании диатомовых комплексов большую роль играли процессы переотложения осадочного материала из активно размываемых морских микулинских осадков. Данное заключение подтверждается и тем, что в глубоководной части котловины, откуда получена рассматриваемая колонка, в голоцене накапливаются глинисто-алевритовые осадки, тогда как в доледниковое время здесь формировались песчаные отложения [Andreev et al., 2019].

Кроме того, диатомовые комплексы рассматриваемого периода не имеют аналогов в Ладожском озере в послеледниковое время [Лудикова, 2019; Ludikova et al., 2021].

Продолжается изучение диатомовых водорослей из голоценовых разрезов донных отложений Ладожского озера [Лудикова, 2018, 2023; Kostrova et al., 2019; Sapelko et al., 2019, 2024; Ludikova, 2020; Лудикова, Кузнецов, 2021; Сапелко и др., 2021]. Современные представления о систематике и экологии диатомовых водорослей, а также использование в качестве вспомогательной группы индикаторных микрофоссилий цист золотистых водорослей позволяют расширить имеющиеся знания об отклике ладожской экосистемы на изменения термического, гидрохимического и гидробиологического режимов в связи с изменениями климата, глубины и конфигурации озера. Значения концентрации цист позволяют косвенно оценивать продуктивность сообществ хризофитов в прошлом. Поскольку золотистые водоросли, помимо прочих биогенных элементов (P, N), остро конкурируют с диатомовыми за растворенный кремнезем, изменения значений отношения «цисты : диатомеи» указывают на изменения условий водной среды, в результате которых хризофиты получали конкурентное преимущество по сравнению с диатомеями или, напротив, оказывались менее конкурентоспособными [Лудикова, 2023]. На основании диатомового анализа колонок донных отложений, отобранных в открытой части Ладожского озера, выявлены следующие закономерности. Для отложений начала голоцена характерны низкие концентрации не только створок диатомей, но и цист хризофитов, что указывает на суровые обстановки в ладожской котловине, неблагоприятные для развития обеих групп кремнистых микроводорослей (дефицит биогенных элементов, низкая температура). В дальнейшем улучшение природно-климатических условий способствовало росту концентраций створок и цист. Концентрации створок диатомей в несколько раз превосходят концентрации цист, указывая на то, что продуктивность диатомовых водорослей в Ладожском озере в прошлом, как и в настоящее время, превышала продуктивность золотистых. При этом для первой половины голоцена характерны более высокие значения отношения «цисты : диатомеи», достигающие максимальных величин в раннем голоцене и указывающие на более высокий вклад золотистых водорослей в состав фитопланктонных палеосообществ. Поскольку хризофиты в Ладожском озере преимущественно развиваются на стадии биологического лета, их высокое

относительное содержание в отложениях первой половины голоцена может свидетельствовать о низкой конкуренции со стороны летних видов диатомей и других представителей фитопланктона [Лудикова, 2023]. Это подтверждается и абсолютным преобладанием в составе диатомовых комплексов *Aulacoseira islandica* – массового ранневесеннего вида ладожского фитопланктона, позволяющим говорить об отличии термических и гидробиологических условий данного периода от современных [Лудикова, Кузнецов, 2021]. Резкое возрастание концентраций створок диатомей и обогащение видового состава диатомовых комплексов во второй половине голоцена предполагает установление более благоприятных условий для развития диатомовых водорослей, несмотря на начавшееся ухудшение природно-климатических условий. Помимо обогащения ладожских вод биогенными элементами [см. Давыдова, 2002], затопление прибрежных низменностей водами ладожской трансгрессии способствовало увеличению площади литоральной зоны, где начинается весеннее развитие диатомового фитопланктона [Ludikova, 2020]. Также можно предположить, что в условиях похолодания диатомовые водоросли оказались более конкурентоспособными по сравнению с массовыми представителями ладожского фитопланктона, в том числе с золотистыми водорослями, концентрации цист которых во второй половине голоцена сравнительно невысоки. Появление в качестве содоминанта *Aulacoseira islandica* планктонной *Aulacoseira subarctica* (в более ранних работах ее различные морфотипы определялись как три разных таксона – *Aulacoseira italica*, *A. italica* ssp. *subarctica* и *A. (distans* var.) *alpigena*) может указывать на увеличение продолжительности периода весенней циркуляции вследствие медленного прогрева водных масс в условиях более прохладного климата. Заметное снижение значений отношения «цисты : диатомеи» может свидетельствовать об изменениях термического режима озера, а также об усилении конкуренции со стороны представителей летнего диатомового планктона (виды родов *Cyclotella* sensu lato и *Stephanodiscus* spp.). Выявленные закономерности представляют большой интерес для изучения развития экосистемы Ладожского озера и могут быть использованы для биостратиграфического расчленения и корреляции разрезов донных отложений голоцена из разных частей ладожской котловины.

Продолжается ряд **мониторинговых наблюдений за изменениями состава диатомовых комплексов в поверхностных осадках**

с целью изучения состояния Ладожского озера на современном этапе. Согласно концепции геоэкологического мониторинга Ладожского озера [Davydova et al., 2000] исследования состава субфоссильных диатомовых комплексов выполнялись с интервалом не менее 10 лет, в 2001/2004 г. и в 2016 г. Полученные результаты позволили оценить состояние экосистемы Ладожского озера на этапе деэвтрофирования [Лудикова, 2017, 2021; Ludikova, 2021]. Отмечено снижение доли видов – индикаторов антропогенного эвтрофирования, вплоть до их полного исчезновения из состава диатомовых комплексов. При этом особенности современного состава диатомовых комплексов указывают на то, что экосистема Ладожского озера не вернулась в свое доантропогенное состояние. В настоящее время наиболее многочисленными видами диатомовых комплексов являются массовые представители весеннего диатомового планктона *Aulacoseira islandica* и *A. subarctica*, суммарное содержание которых на большинстве глубоководных станций превышает 60–70 %. В свою очередь, *Asterionella formosa*, характерный вид летнего планктона, в массе отмечаемый в поверхностных пробах в начале 1960-х годов, в настоящее время практически отсутствует в составе субфоссильных диатомовых комплексов. Это свидетельствует о существенной перестройке в составе сезонных комплексов фитопланктона в ходе деэвтрофирования Ладожского озера. На этапе антропогенного эвтрофирования (конец 1960-х – 1-я половина 1980-х годов) в результате повышения фосфорной нагрузки массовое развитие этого представителя летнего диатомового планктона сместилось на стадию поздней биологической весны вследствие напряженных конкурентных отношений с другими летними группами водорослей. Исследования ладожского фитопланктона показали, что в ходе деэвтрофирования в целом снизилась роль диатомей в составе летнего фитопланктона [Летанская, Протопопова, 2012], в отличие от доантропогенного этапа, когда диатомовые водоросли доминировали в составе фитопланктона в течение всего сезона вегетации. Это нашло отражение в составе диатомовых комплексов, в которых доминируют представители весеннего диатомового планктона *Aulacoseira* spp. в условиях пониженного содержания фосфора, сдерживающих развитие *A. formosa*. Высокая численность *A. subarctica*, весеннее цветение которой начинается несколько позже *A. islandica*, вероятно, является следствием климатических изменений последних декад, проявившихся в мягких

зимах, менее суровых ледовых условиях на Ладожском озере и меньшей частоте появления и площади ледового покрова. Это должно было способствовать увеличению численности *A. subarctica* в весеннем фитопланктоне, т. к. массовому развитию этого вида благоприятствуют короткие зимы и продолжительная весенняя циркуляция. Таким образом, на процесс деэвтрофирования и восстановления состояния Ладожского озера накладываются климатические изменения, приводящие к смещению временных рамок биологических сезонов в озере [Лудикова, 2021].

С целью реконструкции пространственно-временных рамок трансгрессивных стадий Ладожского озера проводится **изучение диатомовых водорослей из отложений**, сформировавшихся в котловинах малых озер Приладожья, ранее затоплявшихся ладожскими водами. Особое внимание уделяется изучению проявлений среднеголоценовой ладожской трансгрессии как наиболее дискуссионного эпизода послеледниковой истории Ладожского озера. Для этого применяется модифицированный метод изоляционных бассейнов. В основе данного подхода лежит тот факт, что осадки, формировавшиеся на дне малых озер на этапе вхождения их котловин в состав крупного бассейна и после изоляции от него, характеризуются не только различным литологическим и геохимическим составом, но и различным составом диатомовых комплексов: на этапе трансгрессии крупного бассейна в составе диатомовых комплексов в малом водоеме присутствуют (и зачастую доминируют) так называемые «виды больших озер». В результате изоляции в котловине малого водоема устанавливаются гидродинамические, гидрохимические, гидробиологические условия, отличающиеся от условий крупного бассейна. Представители «видов больших озер» исчезают из состава диатомовых комплексов, а им на смену приходят так называемые «виды малых озер», типичные для мелководных водоемов с органогенным осадконакоплением [Лудикова и др., 2016]. Выявление сходства видового состава диатомовых комплексов на этапе проникновения вод Ладоги в котловины малых водоемов и определенных закономерностей его изменения в связи с прекращением поступления ладожских вод позволило выделить группу видов, исчезающих из состава диатомовых комплексов после изоляции. Это дает основание использовать их в качестве индикаторов среднеголоценовой ладожской трансгрессии [Лудикова, 2015]. Использование данных об абсолютной отметке порога стока из мало-

го озера и результатов датирования осадков, соответствующих изоляции, устанавливаемой по исчезновению из состава диатомовых комплексов индикаторных ладожских видов, позволяет реконструировать уровень и время завершения ладожской трансгрессии на различных ключевых участках, характеризующихся одинаковой амплитудой гляциоизостатического поднятия [Лудикова и др., 2016].

Применение данного подхода позволило установить время завершения ладожской трансгрессии для разновысотных озер северо-восточной части Карельского перешейка [Dolukhanov et al., 2009, 2010; Кузнецов и др., 2015; Alenius et al., 2020], островов Ладожского озера – Путсаари и Валаама [Лудикова и др., 2005; Сапелко и др., 2023]. Кроме того, впервые данными диатомового анализа подтверждено существование палеопротолива в северной части Карельского перешейка, по которому осуществлялся сток из Ладожского озера до образования р. Невы. Исчезновение индикаторных ладожских видов из состава диатомовых комплексов позволило установить и датировать время прекращения этого Балтийско-Ладожского соединения [Dolukhanov et al., 2009, 2010; Кузнецов и др., 2015; Кузнецов и др., 2022; Ludikova et al., 2024].

Присутствие индикаторных видов диатомей позволяет также диагностировать отложения, связанные с ладожской трансгрессией, в береговых разрезах и археологических памятниках, перекрытых водными наносами [Ludikova, 2014; Лудикова, 2015; Rusakov et al., 2022; Лудикова и др., 2024].

Заключение

Основные направления в изучении истории развития Ладожского озера по материалам диатомового анализа, заложенные в XX в., продолжают разрабатываться в настоящее время. Изучение диатомовых комплексов из колонок донных отложений позволяет получать новые данные и уточнять существующие представления об основных этапах эволюции Ладожского озера с учетом современных сведений о систематике и экологии диатомовых водорослей. Использование цист золотистых водорослей в качестве вспомогательной индикаторной группы микрофоссилий позволяет расширить имеющиеся знания об отклике ладожской экосистемы на изменения термического, гидрохимического и гидробиологического режимов в связи с изменениями климата, а также глубины и конфигурации озера. Продолжение ряда мониторинговых наблюде-

ний за изменениями состава субфоссильных диатомовых комплексов дает возможность оценивать состояние ладожской экосистемы на современном этапе деэвтрофирования, учитывая вклад в этот процесс климатических изменений последних десятилетий. Применение модифицированного метода изоляционных бассейнов для реконструкции пространственно-временных рамок трансгрессивных стадий Ладожского озера с использованием индикаторных видов диатомей дает возможность выявлять свидетельства проникновения ладожских вод в котловины малых озер. Это, в свою очередь, позволяет реконструировать изменения уровня Ладожского озера в голоцене.

Литература

- Абрамова С. А., Давыдова Н. Н. К палеолимнологии Ладожского озера // Известия ВГО. 1966. Т. 98, вып. 1. С. 19–25.
- Абрамова С. А., Давыдова Н. Н., Квасов Д. Д. История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов // История озер Северо-Запада. Л., 1967. С. 113–132.
- Арсланов Х. А., Гей Н. А., Давыдова Н. Н., Джиноридзе Р. Н., Кошечкин Б. И., Пушенко М. Я., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А., Субетто Д. А., Хомутова В. И. Новые данные по позднеплейстоценовой и голоценовой истории Ладожского озера // Известия РГО. 1996. Т. 128, вып. 2. С. 12–21.
- Гильзен К. К. Исследования образцов грунта южной и средней части Ладожского озера // Известия РГО. 1905. Т. 41, вып. 4. С. 737–748.
- Давыдова Н. Н. Диатомовая флора голоценовых отложений Ладожского озера // Ископаемые диатомовые водоросли СССР. М.: Наука, 1968. С. 97–102.
- Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов голоцена. Л.: Наука, 1985. 224 с.
- Давыдова Н. Н. Изучение процесса эвтрофирования по показателям сапробности, вычисленным для диатомовых комплексов поверхностного слоя донных отложений // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, 1982. С. 206–209.
- Давыдова Н. Н. К характеристике диатомовых водорослей донных отложений Ладожского озера // Ботанический журнал. 1961а. Т. XLVI. С. 722–726.
- Давыдова Н. Н. Опыт районирования поверхностных донных осадков Ладожского озера по составу диатомового комплекса // Известия ВГО. 1961б. Т. 93, № 3. С. 211–223.
- Давыдова Н. Н. Палеолимнология Ладоги в поздне- и послеледниковое время по данным диатомового анализа // Материалы к симпозиуму по истории озер Северо-Запада. Л., 1965. С. 111–114.
- Давыдова Н. Н. Развитие экосистемы озера в поздне- и послеледниковые по составу диатомовых комплексов в донных отложениях // Ладожское озеро: Прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 157–164.
- Давыдова Н. Н. Изменения экологических условий в озере по данным диатомового анализа (Ладожское озеро) // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Ред. Д. Д. Квасов, Г. Г. Мартинсон, А. В. Раукас. Л.: Наука, 1990. С. 53–61.
- Давыдова Н. Н. Состав и условия формирования диатомовых комплексов в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: Наука, 1968а. С. 131–174.
- Давыдова Н. Н., Делюсина И. В., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А., Субетто Д. А., Хомутова В. И. Донные отложения Ладожского озера и его эволюция в позднем плейстоцене – голоцене // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / Ред. Н. Н. Давыдова, Б. И. Кошечкин. СПб.: Изд-во РГО, 1993. С. 14–24.
- Давыдова Н. Н., Курочкина А. А., Стравинская Е. А., Трифонова И. С. Процессы эвтрофирования в Ладожском озере по материалам изучения донных отложений // Палеолимнологический подход к изучению антропогенного воздействия на озеро. Л.: ГО СССР, 1981. С. 5–13.
- Давыдова Н. Н., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А., Субетто Д. А. Новые данные по стратиграфии донных отложений Ладожского озера // Изучение озерно-болотной формации в целях палеогеографических реконструкций. Таллинн: АН ЭССР, 1986. С. 24–30.
- Давыдова Н. Н., Субетто Д. А. Геоэкологический мониторинг Ладожского озера по палеолимнологическим данным // Ладожское озеро / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. С. 66–75.
- Давыдова Н. Н., Субетто Д. А., Кукконен М., Симола Х. Антропогенное воздействие на геосистему Ладожского озера по материалам многолетнего мониторинга донных отложений // Известия РГО. 1997. Т. 129, № 6. С. 48–58.
- Давыдова Н. Н., Трифонова И. С. Изменения в составе диатомовых комплексов и содержания хлорофилла «а» в осадках разных районов озера // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, 1982. С. 202–206.
- Жузе А. П., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова-Порецкая В. С. Методы исследования // Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные) / Ред. З. И. Глезер, А. П. Жузе, И. В. Макарова, В. С. Шешукова-Порецкая. Л.: Наука, 1974. С. 50–79.
- Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Лудикова А. В. Соединение Ладожского озера с Балтийским морем в позднем голоцене – новые палеолимнологические данные // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506, № 1. С. 111–116. doi: 10.31857/S2686739722600746
- Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Сапелко Т. В., Лудикова А. В. Гидрографическая сеть северной части Карельского перешейка в голоцене по данным о строении отложений малых озер // Геоморфология. 2015. № 1. С. 54–69. doi: 10.15356/0435-4281-2015-1-54-69

Летанская Г. И., Протопопова Е. В. Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) // Биология внутренних вод. 2012. № 4. С. 17–24.

Лудикова А. В. Диатомовые водоросли позднелейстоцен-голоценовых отложений Ладожского озера // Коллективная монография по материалам ежегодной Международной научно-практической конференции LXXI Герценовские чтения. Том I. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2018. С. 407–412.

Лудикова А. В. Диатомовые комплексы ранневалдайских отложений в котловине Ладожского озера // Вопросы современной альгологии. 2019. № 2(20). С. 225–228. doi: 10.33624/2311-0147-2019-2(20)-225-228

Лудикова А. В. Использование субфоссильных диатомовых комплексов в оценке экологического состояния Ладожского озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М., 2021. С. 84–90.

Лудикова А. В. Применение цист хризифитов для изучения развития экосистемы Ладожского озера в голоцене // Микрорепалеонтология: фундаментальные проблемы и вклад в региональное геологическое изучение недр. Труды XVIII Всероссийского микрорепалеонтологического совещания (Санкт-Петербург, 2023 г.). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2023. С. 373–376.

Лудикова А. В. Свидетельства среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера по данным диатомового анализа // Известия РГО. 2015. Т. 147, вып. 4. С. 38–51.

Лудикова А. В. Субфоссильные диатомовые комплексы в оценке состояния водной среды Ладожского озера // Региональная экология. 2017. № 4. С. 53–61.

Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д. Кремнистые микроводоросли в донных отложениях Ладожского озера и их роль в палеолимнологических реконструкциях // Известия РГО. 2021. Т. 153, № 6. С. 46–64.

Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Субетто Д. А., Сапелко Т. В. Использование метода «изоляционных бассейнов» при реконструкции изменений уровня Ладожского озера // Всероссийская конференция по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум): Сб. науч. трудов. СПб.: Лема, 2016. С. 247–253.

Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Федоров И. А., Добышев В. В. Отложения ладожской трансгрессии в долине р. Невы // По Русскому Северу: от палеозоя до четвертичного периода: Мат-лы науч. конф. «Перибалтик-2024». Вологда, 2024. С. 47–50.

Лудикова А. В., Субетто Д. А., Давыдова Н. Н., Сапелко Т. В., Арсланов Х. А. Колебания уровня Ладожского озера в голоцене (на основе палеолимнологических исследований оз. Святого Сергия на о. Путсаари) // Известия РГО. 2005. Т. 137, вып. 6. С. 34–41.

Расплетина Г. Ф. Режим биогенных элементов // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, 1982. С. 79–101.

Сапелко Т. В., Газизова Т. Ю., Моисеенко А. Д., Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Русанов А. Г. Особенности процесса изоляции озера Витальевского (остров Валаам) и динамика растительности в свя-

зи с изменением уровня Ладожского озера в позднем голоцене // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54, № 4. С. 72–89. doi: 10.31857/10.31857/S2949178923040126

Сапелко Т. В., Лудикова А. В., Кузнецов Д. Д., Игнатъева Н. В., Гусева М. А., Терехов А. В. Отражение климатических и антропогенных изменений позднелейстоцен и голоцена в колонках донных отложений Ладожского озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М., 2021. С. 59–81.

Семенович Н. И. Донные отложения Ладожского озера. М.-Л.: Наука, 1966. 124 с.

Скориков А. С. Биологический анализ образцов грунта Ладожского озера // Известия РГО. 1905. Т. 41, вып. 4. С. 748–751.

Ульский А. Ф. Микроскопический анализ грунтов Ладожского озера // Морской сборник. 1864. Т. LXXII, № 8. С. 115–126.

Черемисинова Е. А. Морская диатомовая флора четвертичных отложений котловины Ладожского озера // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1957. Вып. 21. С. 105–112.

Alenius T., Gerasimov D., Sapelko T., Ludikova A., Kuznetsov D., Golyeva A., Nordqvist K. Human-environment interaction during the Holocene along the shoreline of the Ancient Lake Ladoga: A case study based on palaeoecological and archaeological material from the Karelian Isthmus, Russia // The Holocene. 2020. Vol. 30, no. 11. P. 1622–1636. doi: 10.1177/0959683620941071

Andreev A. A., Shumilovskikh L. S., Savelieva L. A., Gromig R., Fedorov G. B., Ludikova A. V., Wagner B., Wennrich V., Brill D., Melles M. Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga // Boreas. 2019. Vol. 48. P. 377–386. doi: 10.1111/bor.12382

Davydova N. N. Ladoga Lake ecosystem during Late Glacial and Holocene and its present state (according to botanical data) // Ita Suomen. Saimaan tutkimus. Joensuu, 1990. P. 85–94.

Davydova N. N., Kukkonen M., Simola H., Subetto D. Human impact on Lake Ladoga as indicated by long-term changes of sedimentary diatom assemblages // Boreal Environ. Res. 1999. Vol. 4. P. 269–275.

Davydova N., Simola H., Subetto D., Pushenko M., Vasiljeva E., Krylenkova N., Scherbak V. Bottom sediments and diatoms as indicators of the present state of the Lake Ladoga ecosystem // Publications of Karelian Institute. 1994. Vol. 111. P. 144–156.

Davydova N., Subetto D., Belkina N., Simola H., Kukkonen M. Palaeolimnology and sediments of Lake Ladoga: monitoring programme proposal // Environmental monitoring in Lake Ladoga. Proposal for a monitoring programme. Karelian Institute. Working Papers. 2000. P. 68–75.

Dolukhanov P. M., Subetto D. A., Arslanov Kh. A., Davydova N. N., Zaitseva G. I., Djiroridze E. N., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savelieva L. A. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Rus-

sia // Quat. Int. 2009. Vol. 203. P. 33–51. doi: 10.1016/j.quaint.2008.04.021

Dolukhanov P. M., Subetto D. A., Arslanov Kh. A., Davydova N. N., Zaitseva G. I., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savelieva L. A. Holocene oscillations of the Baltic Sea and Lake Ladoga levels and early human movements // Quat. Int. 2010. Vol. 220. P. 102–111. doi: 10.1016/j.quaint.2009.09.022

Kostrova S. S., Meyer H., Bailey H. L., Ludikova A. V., Gromig R., Kuhn G., Shibaev Y. A., Kozachek A. V., Ekaykin A. A., Chaplugin B. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes // Boreas. 2019. Vol. 48. P. 361–376. doi: 10.1111/bor.12385

Ludikova A. V. Long-term studies of surface-sediment diatom assemblages in assessing the ecological state of Lake Ladoga, the largest European lake // Geography, Environment, Sustainability. 2021. Vol. 14, no. 1. P. 251–262. doi: 10.24057/2071-9388-2020-174

Ludikova A. V. Siliceous microalgae in the Holocene sediments of Lake Ladoga // Limnology and Freshwater Biology. 2020. No. 4. P. 453–454. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-453

Ludikova A. V. The use of siliceous microfossils from the buried archaeological site in reconstructing the Lake Ladoga transgression // Paleolimnology of Northern Eurasia: Proceedings of the International Conference (Petrozavodsk, 21–25 September, 2014). Petrozavodsk: KarRC RAS, 2014. P. 84.

Ludikova A. V., Subetto D. A., Andreev A. A., Gromig R., Fedorov G. B., Melles M. The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? // J. Paleolimnol. 2021. Vol. 65. P. 85–99. doi: 10.1007/s10933-020-00150-0

Ludikova A. V., Subetto D. A., Kuznetsov D. D., Orlov A. V., Shatalova A. E. New diatom and sedimentary data confirm the existence of the Northern paleo-outlet from Lake Ladoga to the Baltic Sea // Quaternary. 2024. Vol. 7, no. 3. Art. 31. doi: 10.3390/quat7030031

Rusakov A., Fedorova M., Makeev A., Ludikova A., Savelieva L., Golyeva A., Lebedeva M., Sorokin P., Rusakova E., Subetto D. Pedocomplex buried under the Cabin of Peter the Great in St. Petersburg (1703): Genesis, properties and paleoenvironmental inferences // Quat. Int. 2022. Vol. 630. P. 97–109. doi: 10.1016/j.quaint.2021.07.001

Sapelko T., Pozdnyakov Sh., Kuznetsov D., Ludikova A., Ivanova E., Guseva M., Zazovskaya E. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga // Quat. Int. 2019. Vol. 524. P. 67–75. doi: 10.1016/j.quaint.2019.05.028

Sapelko T. V., Ignatyeva N. V., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Guseva M. A., Revunova A. V., Zazovskaya E. P., Pozdnyakov Sh. R. Natural and anthropogenic impacts on Lake Ladoga and its catchment area through the Lateglacial and Holocene according to a new paleolimnological record // J. Paleolimnol. 2024. Vol. 72. P. 241–259. doi: 10.1007/s10933-024-00329-9

Slepukhina T., Belyakova I., Chichikalyuk Y., Davydova N., Frumin G., Kurashov E., Rubleva E., Sergeeva L., Subetto D. Bottom sediments and biocoenoses of northern Ladoga and their changes under human impact // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 23–28.

Smol J. P. The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores: a useful paleolimnological index // Hydrobiologia. 1985. Vol. 123. P. 199–208.

References

Abramova S. A., Davydova N. N. On paleolimnology of Lake Ladoga. *Izvestiya VGO = Proceedings of the All-Union Geographical Society*. 1966;98(1):19–25. (In Russ.)

Abramova S. A., Davydova N. N., Kvasov D. D. History of Lake Ladoga in the Holocene according to spore-pollen and diatom analyses. *Istoriya ozer Severo-Zapada = History of lakes of the North-West*. Leningrad; 1967. P. 113–132. (In Russ.)

Alenius T., Gerasimov D., Sapelko T., Ludikova A., Kuznetsov D., Golyeva A., Nordqvist K. Human-environment interaction during the Holocene along the shoreline of the Ancient Lake Ladoga: A case study based on palaeoecological and archaeological material from the Karelian Isthmus, Russia. *The Holocene*. 2020;30(11):1622–1636. doi: 10.1177/0959683620941071

Andreev A. A., Shumilovskikh L. S., Savelieva L. A., Gromig R., Fedorov G. B., Ludikova A. V., Wagner B., Wennrich V., Brill D., Melles M. Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga. *Boreas*. 2019;48:377–386. doi: 10.1111/bor.12382

Arslanov Kh. A., Gei N. A., Davydova N. N., Dzhinoridze R. N., Koshechkin B. I., Pushenko M. Ya., Rybalko A. E., Spiridonov M. A., Subetto D. A., Khomutova V. I. New data on the Late Pleistocene and Holocene history of Lake Ladoga. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 1996;128(2):12–21. (In Russ.)

Cheremisina E. A. Marine diatom flora of Quaternary sediments of the basin of Lake Ladoga. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda = Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period*. 1957;21:105–112. (In Russ.)

Davydova N. N. Changes in environmental conditions in the lake according to diatom analysis (Lake Ladoga). *Istoriya Ladozhskogo, Onezhskogo, Pskovsko-Chudskogo ozer, Baikala i Khanki = History of Lakes Ladoga, Onega, Pskovsko-Chudskoye, Baikal and Khanka*. Leningrad: Nauka; 1990. P. 53–61. (In Russ.)

Davydova N. N. Composition and conditions of formation of diatom complexes in the surface layer of bottom sediments of Lake Ladoga. *Rastitel'nye resursy Ladozhskogo ozera = Plant resources of Lake Ladoga*. Leningrad: Nauka; 1968. P. 131–174. (In Russ.)

Davydova N. N. Development of the lake ecosystem in the Late and Post-Glacial periods according to the composition of diatom complexes of bottom sediments. *Ladozhskoe ozero: Proshloe, nastoyashchee, budushchee = Lake Ladoga: past, present, future*. St. Petersburg: Nauka; 2002. P. 157–164. (In Russ.)

Davydova N. N. Diatom flora of the Holocene deposits of Lake Ladoga. *Iskopaemye diatomovye vodorosli SSSR = Fossil diatoms of the USSR*. Moscow: Nauka; 1968. P. 97–102. (In Russ.)

Davydova N. N. Diatoms – indicators of natural conditions of the Holocene reservoirs. Leningrad: Nauka; 1985. 224 p. (In Russ.)

Davydova N. N. Experience of zoning of surface bottom sediments of Lake Ladoga according to the composition of the diatom complex. *Izvestiya VGO = Proceedings of the All-Union Geographical Society*. 1961;93(3):211–223. (In Russ.)

Davydova N. N. Ladoga Lake ecosystem during Late Glacial and Holocene and its present state (according to botanical data). *Ita Suomen. Saimaan tutkimus*. Joensuu; 1990. P. 85–94.

Davydova N. N. On the characterization of diatoms of bottom sediments of Lake Ladoga. *Botanicheskiy Zhurnal*. 1961;46:722–726. (In Russ.)

Davydova N. N. Paleolimnology of Ladoga in the Late and Postglacial period according to diatom analysis. *Materialy k simpoziumu po istorii ozer Severo-Zapada = Materials for the symposium on the history of lakes of the North-West*. Leningrad; 1965. P. 111–114. (In Russ.)

Davydova N. N. Studying the eutrophication process according to saprobity indicators calculated for diatom complexes of the surface layer of bottom sediments. *Antropogennoe evtrofirovanie Ladozhskogo ozera = Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga*. Leningrad: Nauka; 1982. P. 206–209. (In Russ.)

Davydova N. N., Delyusina I. V., Rybalko A. E., Spiridonov M. A., Subetto D. A., Khomutova V. I. Bottom sediments of Lake Ladoga and its evolution in the Late Pleistocene – Holocene. *Evolutsiya prirodnykh obstanovok i sovremennoe sostoyanie geosistemy Ladozhskogo ozera = Evolution of natural environments and the current state of the geosystem of Lake Ladoga*. St. Petersburg: RGO; 1993. P. 14–24. (In Russ.)

Davydova N. N., Kukkonen M., Simola H., Subetto D. Human impact on Lake Ladoga as indicated by long-term changes of sedimentary diatom assemblages. *Boreal Environ. Res.* 1999;4:269–275.

Davydova N. N., Kurochkina A. A., Stravinskaya E. A., Trifonova I. S. Eutrophication processes in Lake Ladoga based on the materials of the study of bottom sediments. *Paleolimnologicheskiy podkhod k izucheniyu antropogennogo vozdeistviya na ozera = Paleolimnological approach to the study of anthropogenic impact on lakes*. Leningrad: GO SSSR; 1981. P. 5–13. (In Russ.)

Davydova N. N., Rybalko A. E., Spiridonov M. A., Subetto D. A. New data on stratigraphy of bottom sediments of Lake Ladoga. *Izucheniye ozerno-bolotnoi formatsii v tselyakh paleogeograficheskikh rekonstruktsii = Studying the lake-marsh formation for paleogeographic reconstructions*. Tallinn: AN ESSR; 1986. P. 24–30. (In Russ.)

Davydova N., Simola H., Subetto D., Pushenko M., Vasiljeva E., Krylenkova N., Scherbak V. Bottom sediments and diatoms as indicators of the present state of the Lake Ladoga ecosystem. *Publications of Karelian Institute*. 1994;111:144–156.

Davydova N., Subetto D., Belkina N., Simola H., Kukkonen M. Palaeolimnology and sediments of Lake Ladoga: monitoring programme proposal. *Environmental monitoring in Lake Ladoga. Proposal for a monitoring programme*. Karelian Institute. Working Papers. 2000. P. 68–75.

Davydova N. N., Subetto D. A. Geocological monitoring of Lake Ladoga based on paleolimnological data.

Ladozhskoe ozero = Lake Ladoga. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. P. 66–75. (In Russ.)

Davydova N. N., Subetto D. A., Kukkonen M., Simola H. Anthropogenic impact on the geosystem of Lake Ladoga based on the materials of long-term monitoring of bottom sediments. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 1997;129(6):48–58. (In Russ.)

Davydova N. N., Trifonova I. S. Changes in the composition of diatom complexes and the content of chlorophyll “a” in sediments of different areas of the lake. *Antropogennoe evtrofirovanie Ladozhskogo ozera = Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga*. Leningrad: Nauka; 1982. P. 202–206. (In Russ.)

Dolukhanov P. M., Subetto D. A., Arslanov Kh. A., Davydova N. N., Zaitseva G. I., Djindiridze E. N., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savelieva L. A. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia. *Quat. Int.* 2009;203:33–51. doi: 10.1016/j.quaint.2008.04.021

Dolukhanov P. M., Subetto D. A., Arslanov Kh. A., Davydova N. N., Zaitseva G. I., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Sapelko T. V., Savelieva L. A. Holocene oscillations of the Baltic Sea and Lake Ladoga levels and early human movements. *Quat. Int.* 2010;220:102–111. doi: 10.1016/j.quaint.2009.09.022

Gilzen K. K. Studies of soil samples of the southern and middle part of Lake Ladoga. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 1905;41(4):737–748. (In Russ.)

Jouse A. P., Proshkina-Lavrenko A. I., Sheshukova-Poretskaya V. S. Research methods. *Diatomovye vodrosli SSSR (iskopaemye i sovremennyye) = Diatoms of the USSR (fossil and modern)*. Leningrad: Nauka; 1974. P. 50–79. (In Russ.)

Kostrova S. S., Meyer H., Bailey H. L., Ludikova A. V., Gromig R., Kuhn G., Shibaev Y. A., Kozachek A. V., Ekaykin A. A., Chaplugin B. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes. *Boreas*. 2019;48:361–376. doi: 10.1111/bor.12385

Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Ludikova A. V. The connection between Lake Ladoga and the Baltic Sea in the Late Holocene: New paleolimnological data. *Doklady Earth Sciences*. 2022;506(1):693–697. doi: 10.1134/S1028334X22700076

Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Sapelko T. V., Ludikova A. V. Hydrographic network of the northern part of the Karelian Isthmus in the Holocene according to data on the structure of sediments of small lakes. *Geomorfologiya = Geomorphology*. 2015;1:54–69. (In Russ.). doi: 10.15356/0435-4281-2015-1-54-69

Letanskaya G. I., Protopopova E. V. The current state of phytoplankton in Lake Ladoga (2005–2009). *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2012;4:17–24. (In Russ.)

Ludikova A. V. Diatoms in the Early Weichselian (Valdai) sediments in Lake Ladoga. *Voprosy sovremennoi al’gologii = Issues of Modern Algology*. 2019;2:225–228. (In Russ.). doi: 10.33624/2311-0147-2019-2(20)-225-228

Ludikova A. V. Diatoms of Late Pleistocene-Holocene deposits of Lake Ladoga. *Kollektivnaya*

monografiya po materialam ezhegodnoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii LXXI Gertsenovskie chteniya = Collective monograph based on the materials of the annual International scientific and practical conf. 'LXXI Herzen readings'. Vol. I. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena; 2018. P. 407–412. (In Russ.)

Ludikova A. V. Evidence of the Middle Holocene transgression of Lake Ladoga according to diatom analysis. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2015;147(4):38–51. (In Russ.)

Ludikova A. V. Long-term studies of surface-sediment diatom assemblages in assessing the ecological state of Lake Ladoga, the largest European lake. *Geography, Environment, Sustainability*. 2021;14(N1):251–262. doi: 10.24057/2071-9388-2020-174

Ludikova A. V. Siliceous microalgae in the Holocene sediments of Lake Ladoga. *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;4:453–454. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-453

Ludikova A. V. Subfossil diatom complexes in the assessment of the state of the aquatic environment of Lake Ladoga. *Regional'naya ekologiya = Regional Ecology*. 2017;4:53–61. (In Russ.)

Ludikova A. V. The use of chrysophyte cysts to study the development of the ecosystem of Lake Ladoga in the Holocene. *Mikropaleontologiya: fundamental'nye problemy i vklad v regional'noe geologicheskoe izuchenie nedr. Trudy XVIII Vserossiiskogo mikropaleontologicheskogo soveshchaniya (Sankt-Peterburg, 2023 g.) = Micropaleontology: fundamental problems and contribution to the regional geological study of the subsoil. Proceedings XVIII All-Russian micropaleontological meeting (St. Petersburg, 2023)*. St. Petersburg: VSEGEI; 2023. P. 373–376. (In Russ.)

Ludikova A. V. The use of siliceous microfossils from the buried archaeological site in reconstructing the Lake Ladoga transgression. *Paleolimnology of Northern Eurasia. Proceedings of the International Conference. Petrozavodsk, 21–25 September, 2014*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. P. 84.

Ludikova A. V. The use of subfossil diatom assemblages in assessing the ecological state of Lake Ladoga. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = The current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate*. Moscow; 2021. P. 84–90. (In Russ.)

Ludikova A. V., Kuznetsov D. D. Siliceous microalgae in bottom sediments of Lake Ladoga and their role in paleolimnological reconstructions. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2021;153(6):46–64. (In Russ.)

Ludikova A. V., Kuznetsov D. D., Fedorov I. A., Dobyshch V. V. Sediments of the Ladoga transgression in the valley of the Neva River. *Po Russkomu Severu: ot paleozoya do chetvertichnogo perioda: Mat-ly nauch. konf. «Peribaltik-2024» = Proceedings of the scientific conference Peribaltik-2024: "In the Russian North: from the Paleozoic to the Quaternary period"*. Vologda; 2024. P. 47–50 (In Russ.)

Ludikova A. V., Kuznetsov D. D., Subetto D. A., Sapelko T. V. The use of isolation basins approach in reconstructing Lake Ladoga level changes. *Vserossii-*

skaya konferentsiya po krupnym vnutrennim vodoemam (V Ladozhskii simpozium): Sb. nauch. trudov = All-Russian conference on large inland reservoirs (V Ladoga Symposium). Proceedings of the conference. St. Petersburg: Lema; 2016. P. 247–253. (In Russ.)

Ludikova A. V., Subetto D. A., Andreev A. A., Gromig R., Fedorov G. B., Melles M. The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? *J. Paleolimnol.* 2021;65:85–99. doi: 10.1007/s10933-020-00150-0

Ludikova A. V., Subetto D. A., Davydova N. N., Sapelko T. V., Arslanov H. A. Fluctuations in the level of Lake Ladoga in the Holocene (based on paleolimnological studies of Lake St. Sergius on the Putsaari Island). *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2005;137(6):34–41. (In Russ.)

Ludikova A. V., Subetto D. A., Kuznetsov D. D., Orlov A. V., Shatalova A. E. New diatom and sedimentary data confirm the existence of the Northern paleo-outlet from Lake Ladoga to the Baltic Sea. *Quaternary*. 2024;7(3):31. doi: 10.3390/quat7030031

Raspletina G. F. Regime of biogenic elements. *Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga*. Leningrad: Nauka; 1982. P. 79–101. (In Russ.)

Rusakov A., Fedorova M., Makeev A., Ludikova A., Savelieva L., Golyeva A., Lebedeva M., Sorokin P. Rusakova E., Subetto D. Pedocomplex buried under the Cabin of Peter the Great in St. Petersburg (1703): Genesis, properties and paleoenvironmental inferences. *Quat. Int.* 2022;630:97–109. doi: 10.1016/j.quaint.2021.07.001

Sapelko T. V., Gazizova T. Yu., Moiseenko A. D., Ludikova A. V., Kuznetsov D. D., Rusanov A. G. Lake Vitalievskoye (Valaam Island) isolation process and vegetation dynamics due to changes in the level of Lake Ladoga during the Late Holocene. *Geomorfologiya i Paleogeografiya = Geomorphology and Paleogeography*. 2023;54(4):72–89. (In Russ.). doi: 10.31857/S2949178923040126

Sapelko T. V., Ignatyeva N. V., Kuznetsov D. D., Ludikova A. V., Guseva M. A., Revunova A. V., Zazovskaya E. P., Pozdnyakov Sh. R. Natural and anthropogenic impacts on Lake Ladoga and its catchment area through the Lateglacial and Holocene according to a new paleolimnological record. *J. Paleolimnol.* 2024;72:241–259. doi: 10.1007/s10933-024-00329-9

Sapelko T. V., Ludikova A. V., Kuznetsov D. D., Ignatieva N. V., Guseva M. A., Terekhov A. V. Reflection of climatic and anthropogenic changes. Late Glacial and Holocene in the columns of bottom sediments of Lake Ladoga. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate*. Moscow; 2021. P. 59–81. (In Russ.)

Sapelko T., Pozdnyakov Sh., Kuznetsov D., Ludikova A., Ivanova E., Guseva M., Zazovskaya E. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga. *Quat. Int.* 2019;524:67–75. doi: 10.1016/j.quaint.2019.05.028

Semenovich N. I. Bottom sediments of Lake Ladoga. Moscow; Leningrad: Nauka; 1966. 124 p. (In Russ.)

Skorikov A. S. Biological analysis of soil samples of Lake Ladoga. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 1905;41(4):748–751. (In Russ.)

Slepukhina T., Belyakova I., Chichikalyuk Y., Davydova N., Frumin G., Kruglov E., Kurashov E., Rubleva E., Sergeeva L., Subetto D. Bottom sediments and biocoenoses of northern Ladoga and their changes under human impact. *Hydrobiologia*. 1996; 322:23–28.

Smol J. P. The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores: a useful paleolimnological index. *Hydrobiologia*. 1985;123:199–208.

Ulsky A. F. Microscopic analysis of the soils of Lake Ladoga. *Morskoj sbornik = Marine Collection*. 1864;72(8):115–126. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 04.05.2024; принята к публикации / accepted: 13.08.2024.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Лудикова Анна Валерьевна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: ellerbeckia@yandex.ru

CONTRIBUTOR:

Ludikova, Anna

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

УДК 556; 504.062.2

ЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ И РОЛЬ ИНСТИТУТА ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН В ИХ СТАНОВЛЕНИИ

Н. Л. Болотова

Вологодский государственный университет (ул. Ленина, 15, Вологда, Россия, 160000)

Статья посвящена 80-летию Института озероведения РАН. Рассматривается его важная роль в становлении лимнологических исследований на примере территории Вологодской области. Кратко описана предыстория изучения вологодских озер начиная с фрагментарных данных XVIII века, историческая обусловленность гидрологических изысканий при развитии транспортных водных путей в XIX веке и приоритет рыбохозяйственных исследований озер в XX веке. Отмечена практическая направленность комплексного изучения крупных озер во второй половине XX столетия в рамках их техногенного преобразования. Подчеркивается значение экспедиций Института озероведения АН СССР (ИНОЗ) в 1970-е годы на крупные вологодские озера Кубенское, Белое, Воже как ключевого этапа для перехода к экосистемной стратегии их исследований. Поэтому целью работы стало рассмотрение роли ИНОЗ для повышения эффективности лимнологических исследований на примере территории Вологодской области. С этой позиции проанализировано формирование ленинградской озероведческой школы, ее основных идей, которые способствовали становлению лимнологических исследований вологодских коллег на основе плодотворного сотрудничества. Обсуждается роль Л. А. Жакова, сотрудника ИНОЗ в 1950–1960-е годы, в организации экспедиций в период его работы в Вологодском пединституте, связанный с изучением малых озер области и оз. Воже. Приводятся материалы, посвященные памяти профессора Л. А. Жакова в год 100-летнего юбилея, о его вкладе в развитие лимнологии и подготовку научных кадров. Обосновывается многогранная роль Института озероведения в становлении лимнологических исследований в Вологодской области, связанная с разработкой методологии изучения озер, организацией экспедиций, научным руководством, преемственностью в подготовке кадров и совместной деятельности.

Ключевые слова: лимнологические исследования; Институт озероведения; профессор Л. А. Жаков; Вологодская область

Для цитирования: Болотова Н. Л. Лимнологические исследования в Вологодской области и роль Института озероведения РАН в их становлении // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 143–154. doi: 10.17076/lim1914

N. L. Bolotova. LIMNOLOGICAL RESEARCH IN THE VOLOGDA REGION AND THE ROLE OF THE INSTITUTE OF LIMNOLOGY IN ITS FORMATION

Vologda State University (15 Lenina St., 160000 Vologda, Russia)

The article is dedicated to the 80th anniversary of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences and examines its important role in the development of limnological research through the example of the Vologda Region. The background to the study of Vologda lakes, starting with fragmentary data from the 18th century, the historical conditionality of hydrological surveys during the development of waterways in the 19th century, and the priority of fishery research on lakes in the 20th century are briefly described. It is noted that the comprehensive studies of large lakes in the second half of the 20th century were of applied nature in view of their technogenic transformation. The importance of expeditions of the Institute of Limnology of the USSR Academy of Sciences (INOZ) in the 1970s to the large Vologda lakes Kubenskoye, Beloe, Vozhe is emphasized as a key step towards adoption of an ecosystem-centered strategy for their research. Therefore, the purpose of this review was to examine the role of INOZ in promoting the efficiency of limnological research with the Vologda Region as the example. The formation of the Leningrad "lake science school" and its main ideas, which contributed to the development of limnological research by Vologda colleagues on the basis of fruitful cooperation, are analyzed from this point of view. The role of L. A. Zhakov, who worked at INOZ in the 1950-1960s, in organizing expeditions during his work at the Vologda Pedagogical Institute in the 1970s, dealing with the study of the region's small lakes and Lake Vozhe, is discussed. Materials in commemoration of Professor L. A. Zhakov on the 100th anniversary of his birth, his contribution to the development of limnology and the training of scientific personnel are presented. It is argued that the Institute of Limnology has played a multifaceted role in the development of research in the Vologda Region, related to the development of the methodology for studying lakes, organization of expeditions, scientific leadership, continuity in training and joint activities.

Keywords: limnological studies; Institute of Limnology; professor L. A. Zhakov; Vologda Region

For citation: Bolotova N. L. Limnological research in the Vologda region and the role of the Institute of Limnology RAS in its formation. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 143–154. doi: 10.17076/lim1914

Введение

Актуальность лимнологических исследований в Вологодской области определяется значимостью в гидрографической сети озер разного типа. Их происхождение и развитие обусловлено сложным генезисом территории, подвергавшейся неоднократному оледенению, а затем антропогенной трансформации. В пределах области расположены крупные озера: Белое, Кубенское и Воже, юго-восточная часть Онежского озера, в состав 5 тысяч разнотипных малых и средних озер входят уникальные карстовые экосистемы [Природа..., 2007].

Предыстория становления лимнологических исследований в Вологодской области связана с ее географическим положением, историческими причинами развития территории, а также изменением административных границ. Исходно интерес к крупным озерам края был

связан с их вхождением в древние волоковые пути. Они объединяли Северо-Запад в единое пространство, что при его освоении давало возможность получения знаний о разных водных объектах. Это обусловило становление в первую очередь гидрологических изысканий, стимулом которых было образование Санкт-Петербурга в 1703 г. и последующее строительство Мариинской водной системы. Этим была заложена предпосылка для исторической связи гидрологических исследований территории, на которой в настоящее время располагается Ленинградская и Вологодская область, и водные пути обеспечили доступность для исследований озер Северо-Запада.

Фрагментарные описания вологодских озер, включая немногочисленные данные о рыбах, публикуются с XVIII века в путевых заметках представителей разных слоев общества (путешественников, купцов, военных, краеведов и др.), а также в результатах экспедиций

Российской академии наук. Внимание привлекает использование рыбных богатств водоемов, что подтверждают архивные материалы в статье В. В. Яковлева «Зимние рыбные промыслы на Белом озере в XVII столетии», опубликованной в «Вестнике рыбопромышленников» в 1900 году.

XIX век характеризуется приоритетом гидрологических изысканий, чему способствовало также строительство канала герцога Виртембергского и соединение Северо-Двинского пути с Мариинской системой [Арсеньев, 1879]. На данном этапе закладываются основы систематических наблюдений за уровнем режимом озер, входящих в магистральные транспортные пути. Началось обследование малых озер, среди которых особое внимание привлекали периодически исчезающие карстовые водоемы Мегорского ландшафта [Куликовский, 1894]. Изучение рыболовства в этот период было связано с крупными озерами [Межаков, 1855; Данилевский, 1862].

В первой половине XX в. главным направлением исследований озер становится их рыбохозяйственная оценка. Рыболовный промысел малых озер выборочно обследовался в 1902, 1912, 1915, 1926 годах в западных районах края [Озерные..., 1981]. В 1932 году Всесоюзным научно-исследовательским институтом озерного и речного рыбного хозяйства (ВНИОРХ) было выполнено крупномасштабное кадастровое обследование 2745 озер Ленинградской области, в которую частично входила Вологодская область. Исследования носили комплексный характер с участием гидрологов, гидробиологов, ихтиологов и специалистов по рыболовству. Изучение рыболовства на крупных озерах Белом, Кубенском и Воже проводили известные ученые: И. В. Кучин (1902), Д. П. Жданов (1907), Л. А. Кучин (1926, 1929, 1930), М. О. Васильев (1921), Е. С. Соллертинский (1921), И. Н. Арнольд (1925, 1927), И. Ф. Правдин (1925), П. А. Пушкарев (1927), П. А. Дрягин (1933), В. В. Петров (1947), П. А. Васильев (1955). На 1930-е годы приходятся попытки реконструкции рыбного населения за счет вселения сиговых рыб в Белое озеро, а также был акклиматизирован судак в озере Кубенском. В 1941 г. вологодским исследователем А. Л. Дулькиным публикуются первые сведения о паразитофауне рыб Кубенского озера. Развивается направление, связанное с экологической паразитологией, благодаря деятельности на кафедре зоологии Вологодского пединститута представителей ленинградской школы зоологов (в том числе учеников чл.-корр. АН СССР В. А. Догеля). В 1950-е годы

значительный вклад в изучение паразитофауны рыб Кубенского озера внесла Е. С. Кудрявцева.

В 1950–1951 гг. проведена комплексная экспедиция ВНИОРХ, по результатам которой вышел сборник «Рыболовство на Белом и Кубенском озерах» [1955], где обобщены данные по гидрологическому и гидрохимическому режиму, кормовой базе, рыбному населению, питанию рыб, способам рыбодобычи и промысловому значению этих двух крупных озер области. Вологодским ихтиологом А. А. Остроумовым [1950] и его ленинградским коллегой И. С. Титенковым [1956] закладывается направление, связанное с изучением популяций ценных видов сиговых рыб Кубенского озера. Во второй половине XX в. в связи со строительством Волго-Балтийского водного пути продолжилось комплексное исследование Белого озера. Изучалась гидрология и гидрохимия озера, донные отложения, зоопланктон и бентос, уточнялось геологическое строение водосборного бассейна, его климат и хозяйственное освоение [Гусаков, Дружинин, 1983]. Это дало возможность оценить последствия создания в середине 1960-х годов Череповецкого (Шекснинского) ВДХ и послужило началом мониторинга техногенных экосистем в области. В 1970-е годы изучение крупных озер Вологодской области также стимулировалось практическими потребностями в связи с крупномасштабным проектом переброски северных рек, планируемой через эту территорию. В то же время данный период можно считать особо значимым как этап перехода к лимнологическим исследованиям на экосистемном уровне благодаря усилиям Института озераведения АН СССР.

Целью работы является рассмотрение роли Института озераведения РАН как специализированного научного учреждения для повышения эффективности лимнологических исследований на примере территории Вологодской области.

Результаты и обсуждение

Материалы юбилейных изданий, посвященных истории развития лимнологии в Институте озераведения Российской академии наук отражают значимость ленинградской озераведческой школы для формирования и распространения методологии экосистемного подхода к изучению озер [Трифонова, 2018; 70 лет..., 2017; 80 лет..., 2023]. Ключевым организационным моментом явилось создание в 1944 г. Лаборатории озераведения АН СССР. С самого начала деятельности ее ведущих

ученых, разрабатывающих методологию лимнологии, в круг объектов исследований входили и крупные озера Вологодской области. Так, Николай Иванович Семенович, первый ученый секретарь Лаборатории озероведения, до перехода на эту должность был руководителем группы кадастра озер Северо-Запада Государственного гидрологического института (ГГИ) и занимался в том числе изучением озер Кубенского и Воже [80 лет..., 2023]. Накопленный опыт комплексного подхода к исследованию озер он применил на Карельском перешейке, где на оз. Красном (Пуннус-Ярви) была основана в 1948 г. в качестве экспериментально-методической базы Лимнологическая станция. Наряду с гидрохимией и донными отложениями большая роль отводилась гидробиологическим исследованиям. Таким образом начала формироваться научная школа, и результаты исследований разных специалистов были обобщены в сборнике «Озера различных ландшафтов Северо-Запада СССР» [1968]. Алгоритм исследований включал типологические особенности малых озер, начиная от характера озерных котловин до структуры рыбного населения, связанных как часть целого с ландшафтами через свое происхождение и эволюцию [Озера..., 1968].

Следует подчеркнуть, что становление лимнологических исследований в Вологодской области на методологической основе ленинградской озероведческой школы тесно связано с научной судьбой Льва Андреевича Жакова, 100-летие со дня рождения которого отмечалось в 2023 году [Филиппов, Болотова, 2023]. Памяти известного лимнолога, ихтиолога и педагога Л. А. Жакова после его ухода из жизни в 2005 году были посвящены IV (XXVII) Международная конференция «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера» (г. Вологда, 2005 г.) и несколько сборников научных трудов его учеников, вологодских и ярославских коллег [Болотова, Тихонов, 2005; Тихонов, 2005; Болотова и др., 2006].

Герой-фронтовик, окончивший после демобилизации биологический факультет Ленинградского госуниверситета по кафедре ихтиологии и гидробиологии, Лев Андреевич Жаков в 1951 г. стал научным сотрудником Лимнологической станции на оз. Красном. Там произошло переросшее в крепкую дружбу знакомство с гидрофизиком Владимиром Владимировичем Меншуткиным, что определило новую траекторию его ихтиологических исследований и заложило основу пионерского направления – моделирования ихтиоценозов [Меншуткин, Жаков, 1963; Жаков, Меншуткин, 1974]. Как отмечает

в своих воспоминаниях В. В. Меншуткин, модель популяции окуня озер Пуннус-Ярви и Херя-Ярви стала основой кандидатских диссертаций обоих ученых, и в соавторстве ими было опубликовано 10 работ [Меншуткин, 2012]. Перспективность направления, связанного с моделированием озерных процессов, была своевременно поддержана такими известными учеными, как Г. Г. Винберг и П. В. Терентьев. Созданные в этот период популяционные модели ихтиоценозов были одними из первых в мире. В дальнейшем опыт математического моделирования использован В. В. Меншуткиным в рамках сотрудничества с ИНОЗ в 1980-х годах для создания модели экосистемы Ладожского озера.

Подготовка и защита кандидатской диссертации Л. А. Жакова [1966] проходила в период, когда в Лаборатории озероведения под руководством академика Станислава Викентьевича Калесника в 1960-е годы успешно разрабатывался ландшафтный подход вкуче с гидрологическими, гидрохимическими и гидробиологическими режимными исследованиями [80 лет..., 2023]. Апробировалась методология изучения лимнологических циклов для понимания продукционных процессов Иваном Ивановичем Николаевым, который позже исследовал зоопланктон озера Кубенского [Озеро..., 1977]. Озероведческая школа, которую прошел Л. А. Жаков, была представлена сильным научным коллективом, включающим метеорологов, гидрологов, гидрохимиков и гидробиологов. В дальнейшем это определило методологическую преемственность в организации экспедиций по изучению малых озер Вологодской области, когда Лев Андреевич с 1967 г. стал заведовать кафедрой зоологии Вологодского государственного педагогического института (ВГПИ).

Исследования малых озер проводились в 1969–1974 гг. по заданию областного управления рыбной промышленностью. В экспедиции участвовали преподаватели кафедр географии и химии и более 60 студентов естественно-географического факультета ВГПИ. Благодаря руководству Л. А. Жакова исследования не ограничились оценкой рыбохозяйственного значения водоемов. Во главу угла был поставлен ландшафтный подход, что потребовало выбора критериев типизации малых озер и их районирования. При обследовании 275 озер, находящихся в разных ландшафтных условиях, выявлены достаточно отчетливые типологические характеристики. На ландшафтной основе установлены особенности зарастания, классифицированы типы ихтиоценозов вологодских

озер и основные тенденции лимногенеза, что позволило внести изменения в схему районирования в границах Вологодского Поозерья. Важным выводом исследований была оценка значимости ландшафта, определяющего разнообразие озерных сообществ, уровень развития кормовой базы и рыбопродуктивность. Результаты лимнологических исследований обобщены в сборнике «Озерные ресурсы Вологодской области» [1981]. Дальнейшему развитию ландшафтного подхода в исследованиях, в том числе крупного озера Воже, способствовало тесное сотрудничество с заведующим кафедрой географии ВГПИ Германом Алексеевичем Воробьевым, у которого также была ленинградская школа и защита диссертации по этому направлению [Воробьев, Жаков, 1975].

Озероведческая экспедиция стала хорошей профессиональной школой, что навсегда определило для некоторых ее участников выбор преподавательской и научной деятельности. Например, доцент и кандидат химических наук Ольга Борисовна Кузнецова и в настоящее время преподает на кафедре биологии и химии ВоГУ. Материалы исследований озер вошли в десятки дипломных работ, ряд научных сборников, в несколько кандидатских диссертаций, а также в докторскую диссертацию Л. А. Жакова.

Ключевым событием для формирования экосистемного подхода к исследованию крупных вологодских озер стало участие ИНОЗ в составлении прогноза экологических последствий предполагаемой переброски вод северных рек в бассейн р. Волги. На основе Ладожской экспедиции была создана Вологодско-Архангельская экспедиция, которая в 1972–1975 гг. проводила исследования озер Кубенское и Воже под руководством Игоря Михайловича Распопова и Тamarы Ивановны Малининой. Результаты экспедиций по Кубенскому озеру были опубликованы сначала в брошюре «Кубенское озеро» [1974], затем в трех частях коллективной монографии «Озеро Кубенское» [1977]. По озеру Воже также сначала вышли предварительные материалы «Озера Лача и Воже: Материалы комплексных исследований» [1975]. Позже была издана монография в 2-х частях: «Гидробиология озер Воже и Лача» [1978] и «Гидрология озер Воже и Лача» [1979].

В этот период продолжалось активное сотрудничество с вологодскими коллегами. Так, за ихтиологическую часть исследований Кубенского озера отвечал преподаватель кафедры зоологии ВГПИ Валерий Геннадьевич Лебедев [1977], и полученные материалы использованы

в его кандидатской диссертации, защищенной в Ленинграде. Л. А. Жаков занимался исследованием рыбного населения озера Воже, и эти материалы вошли в его докторскую диссертацию [Жаков, 1974, 1975, 1979]. Вологодскими ихтиологами был представлен развернутый прогноз негативных изменений в составе рыбного населения озер Кубенского и Воже при реализации проекта переброски вод [Лебедев, 1977, 1985; Жаков, 1978].

В 1973–1977 годах экспедициями ИНОЗ проводилось детальное исследование экосистемы Белого озера, и результаты в 1981 году опубликованы в двух частях монографии «Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР» [1981]. В первой части, «Гидрология и гидрохимия», описаны природные условия на водосборе, этапы освоения озера, водный и тепловой балансы, динамика водных масс, гидрофизические свойства воды, гидрохимия, сделана оценка изменений в режиме озера, превращенного в водохранилище в результате строительства Череповецкой ГЭС. Во второй части монографии, «Гидробиология и донные отложения озера Белого», обобщены материалы исследований по составу и продукции бактерио-, фито- и зоопланктонных сообществ, а также материалы по ихтиофауне и кормовой базе рыб оз. Белого. Проанализированы результаты изучения донных отложений озера и связанных с ними бентосных сообществ (бактериобентос, перифитон, макрофиты, зообентос). Большое внимание уделено последствиям хозяйственного влияния на экосистему озера и проблеме разграничения степени и характера воздействия природных и антропогенных факторов на озерные сообщества. Две части монографии были дополнены научно-популярным изданием «Белое озеро: прошлое, настоящее и будущее» [Гусаков, Дружинин, 1983]. В этой книге приводятся сведения об истории Белозерского края, водосборе Белого озера, рыбном промысле и способах лова, использовании озера в качестве звена Волго-Балтийского пути. Особое внимание уделено итогам изучения звеньев озерной экосистемы, включая характеристику рыбного населения, прогнозу последствий преобразования озера в водохранилище и при реализации проекта переброски стока северных рек на юг [Гусаков, Дружинин, 1983]. В дальнейшем результаты исследований крупных озер Вологодской области также вошли в монографию И. М. Распопова «Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР», изданную в 1985 г., и в докторскую диссертацию Т. Д. Слепухиной «Экология макробентоса

больших озер Северо-Запада СССР», защищенную в 1991 г.

К важным теоретическим разработкам ИНОЗ в 1970-е годы относится проблема происхождения крупных озер, проанализированная Дмитрием Дмитриевичем Квасовым в книге «Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы» [1975]. Проведенные исследования охватывали и озера-разливы на территории Вологодской области (Белое, Кубенское, Воже), являющиеся реликтами крупного приледникового озера. Олег Александрович Алекин, став в 1978 г. директором ИНОЗ, обратил особое внимание на гидрохимические исследования в рамках проблемы эвтрофирования озер и определения биогенных нагрузок [80 лет..., 2023]. Это наиболее актуальный вопрос для мелководных озер Вологодской области и на современном этапе.

Значимым вкладом Института озероведения в продолжение дальнейших исследований вологодских озер явилась подготовка научных кадров гидробиологов, которые в будущем стали преподавателями естественно-географического факультета ВГПИ и передавали свои знания студентам. Так, Инна Николаевна Андроникова руководила подготовкой кандидатской диссертации Татьяны Святославовны Пихтовой «Количественная оценка трофических связей между зоопланктоном и рыбами-планктофагами больших мелководных водоемов Северо-Запада СССР: на примере озера Белого», защищенной в 1983 г. Зообентос Белого озера изучался Ольгой Владимировной Выголовой в сотрудничестве с Тамарой Дмитриевной Слепухиной.

Подготовка научных кадров лимнологов была продолжена Л. А. Жаковым в 1980-х годах в открытой им аспирантуре после перехода на работу в Ярославский госуниверситет и защиты в Ленинграде докторской диссертации [Жаков, 1979]. Автор настоящей статьи стала первой аспиранткой Л. А. Жакова, защитившей кандидатскую диссертацию по материалам трофологических исследований малых озер Вологодской области по теме «Взаимоотношения рыб с кормовой базой малых озер, заселяемых сига́ми» [Болотова, 1986]. Выполненная работа отражала преемственность направления, связанного с научным обоснованием выращивания сиговых рыб и сложившегося еще на озерах Карельского перешейка в период работы Льва Андреевича на Лимнологической станции ИНОЗ. Так, в 1957–1963 гг. им были опубликованы шесть работ, которые обобщали опыт выращивания сигов и нельмы, а в кандидатской диссертации впервые анализировался

вопрос о выживании вселенных рыб в зависимости от численности аборигенных хищников [Жаков, 1966]. По сути, это была первая модель интродукции нового вида в устоявшееся сообщество, и значимость такой постановки задачи стала понятна только в настоящее время в рамках глобальной проблемы биоинвазий [Меншуткин, 2012]. Необходимость учета регулирующей роли хищников подтвердилась безрезультатными попытками выращивания сиговых в вологодских озерах в 1980-е годы, а трофологические исследования позволили обосновать определяющее значение взаимодействия трофических ниш для формирования сообщества, в том числе и при его реконструкции [Болотова, 1986; Болотова, Жаков, 1989].

Вышедшая в 1984 году монография Л. А. Жакова «Формирование и структура рыбного населения озер Северо-Запада СССР» является фундаментальным итогом его научной деятельности. Разработанная концепция озерных ихтиоценозов основывалась на исследованиях 1240 ихтиоценозов озер Карельского перешейка (1957–1967 гг.) и Вологодской области (1967–1977 гг.), а также включала анализ литературных данных о более чем 800 озерах Псковской, Архангельской, Ярославской областей, Эстонии и Швеции [Жаков, 1984]. Рассмотрена направленность биогеографических процессов формирования ихтиофауны Северо-Запада, определяемая изменениями климата и гидрографии. Показано, что состав ихтиофауны определен экологическими условиями в зонах контактов между бассейнами и биологическими особенностями видов, так и процессами видообразования, приводящими к нарастанию эндемизма фауны изолированных водоемов [Жаков, 1979, 1984]. Обоснование положения об определяющем значении ландшафта для направления и скорости сукцессий озер, наряду с установленными закономерностями изменения ихтиоценозов под влиянием природных факторов хозяйственного воздействия, является теоретическим вкладом в экологию водных экосистем. В сотрудничестве с В. В. Меншуткиным впервые в компьютерном варианте, а не на бумажных карточках была создана база данных по вологодским озерам, включавшая по 43 показателя для каждого из 275 озер [Меншуткин, 2012]. Принципы модельного подхода к исследованию малых озер, сформировавшиеся еще в период работы на Лимнологической станции ИНОЗ, были применены Л. А. Жаковым к крупному озеру Воже. Разработанная им модель сообщества рыб озера Воже в рамках теории функционирования озерных ихтиоценозов положила начало созданию серии моделей,

включая разработки для Ладожского и Онежского озер [Меншуткин, 2012].

В 1980-е годы другие крупные озера Вологодской области – Белое и Кубенское – также входили в круг комплексных экспедиций на озера различных географических зон, организацию которых инициировал академик Алексей Федорович Трешников, будучи в тот период директором Института озероведения [80 лет..., 2023]. Исследования, направленные на обобщение накопленной многоплановой информации по озерам России, продолжились под руководством академика РАН Владислава Александровича Румянцева, директора ИНОЗ с 1988 г. [80 лет..., 2023]. Результатом стало издание серии «История озер», и данные по исследованиям озер Вологодской области вошли в том «Озера Европейской части России» [Румянцев и др., 2015].

Важно подчеркнуть, что с 1991 года в Институте озероведения под председательством В. А. Румянцева начал функционировать Специализированный совет по защите кандидатских и докторских диссертаций. Автор данной статьи защищала в 1999 году свою докторскую диссертацию именно в этом совете, членами которого были участники комплексных экспедиций на крупных озерах Вологодской области в 1970-е годы. Тем более что в рамках тематики диссертации «Изменения экосистем мелководных северных озер в антропогенных условиях (на примере водоемов Вологодской области)» предыдущие исследования ИНОЗ крупных озер послужили фоновыми материалами. Это дало возможность сравнительного анализа изменений экосистем озер Белого, Кубенского и Воже за 25-летний период, что легло в основу развития представлений о закономерностях их антропогенных сукцессий [Болотова, 1999]. Показано, что процесс эвтрофирования мелководных озер является приоритетной составляющей антропогенных сукцессий, наряду с трендами токсификации и закисления.

Диссертация посвящалась профессору Льву Андреевичу Жакову, «чей пример беззаветного служения науке вдохновил на выполнение данной работы», а ее содержание также отражало преемственность ленинградской озероведческой школы моего Учителя. Так, детальная разработка им теоретического положения о проявлении ландшафтных особенностей водосборных бассейнов в лимнологических характеристиках малых озер Вологодской области, включая зарастание, стала основанием для анализа параметра мелководности как аттрактора озерных процессов в рамках синергетического подхода [Болотова, 1999]. Работы

Л. А. Жакова [1974, 1984] создавали основу для проникновения в ихтиологию синергетических идей, хотя они и не декларировались. Однако по своей сути рассмотрение формирования ихтиоценозов малых северных озер во взаимосвязи с этапами лимногенеза, ландшафтной обусловленностью, изменениями климата служит анализом процессов самоорганизации и саморазвития экосистем.

Другое выдвинутое Л. А. Жаковым [1974, 1984] положение об истории формирования ихтиофауны северных озер при изменении условий через внедрение представителей низкоширотных фаунистических комплексов также нашло развитие в наших исследованиях. Динамика фаунистических комплексов была рассмотрена с позиции их иерархической значимости как функциональных подструктур рыбной части сообщества, поддерживающих устойчивость озерных экосистем, особенно при антропогенной нагрузке [Болотова, 1999]. Актуальность этого подхода для анализа перестроек рыбного населения возрастает на современном этапе потепления климата и биоинвазий.

Ранее созданная модель ихтиоценоза оз. Воже [Жаков, 1984] оказалась эффективным инструментом для осмысления перестроек рыбного населения других крупных озер Белого и Кубенского через взаимодействие пищевых ниш в сообществах [Болотова, 1999]. Заключение о том, что «сукцессии выражаются не только в смене структуры биоценозов, но и в смене типов круговорота вещества и путей потока энергии» [Жаков, 1984], подтвердилось в рамках применения энергетического подхода к анализу изменения озерных экосистем в последующие десятилетия [Болотова, 1999]. Следует подчеркнуть, что преемственность исследований, связанных с оценкой влияния водосбора на озеро как подсистему и накапливающий элемент ландшафта, изучение закономерностей функционирования системы «водосбор – водоем» служат эффективным иерархическим подходом для разработки дискуссионного понятия устойчивости экосистем.

С открытием в 2000 г. профессором Н. Л. Болотовой аспирантуры в Вологодском государственном педагогическом институте (сейчас Вологодский государственный университет) продолжается подготовка кадров лимнологов, защищена серия кандидатских диссертаций. В основе исследований крупных и разнотипных малых озер Вологодской области лежит ландшафтный и экосистемный подход, методологические приемы оценки состояния трофических уровней сообществ, разработанные и апробированные в течение многих

десятилетий специалистами ИНОЗ. Особое внимание уделяется процессам антропогенного эвтрофирования, учитывая их быструю продвинутость в преобладающих на территории области мелководных озерах с трансформированными водосборами. В последнее десятилетие актуальными направлениями изучения озер стали проблема их токсификации, включая ртутное загрязнение, применение патолого-морфологического и гистологического анализа для оценки качества рыбных ресурсов. Изучается региональный сценарий влияния климатических факторов на изменение структуры озерных сообществ. Разнообразие ландшафтной структуры территории Вологодской области дает возможность выявлять специфику антропогенных трансформаций озер в условиях различных геохимических ландшафтов, что относится к одной из важных задач развития лимнологии. Прохождение по территории Вологодской области водораздела бассейнов стока трех морей (Белого, Балтийского, Каспийского) и их соединение магистральными водными путями усугубляет проблему распространения чужеродных видов. Поэтому особое внимание уделяется оценке угроз биоинвазий как для региона, так и для соседних территорий. Немаловажное значение имеют проводимые исследования последствий интродукции рыб и развития аквакультуры. Истоки теоретического осмысления последнего направления можно найти в идее регуляции ихтиоценозов Л. А. Жакова, зародившейся еще в период его исследований в 1950–1960-х годах на Лимнологической станции ИНОЗ и ставшей основой защищаемых положений его кандидатской диссертации [Жаков, 1966]. Наблюдаемая деградация озер, ухудшение качества воды, снижение биоразнообразия и рыбных ресурсов стимулировали природоохранное направление лимнологических исследований. К значимым результатам можно отнести внесение целого комплекса видов водных растений и животных в Красную книгу Вологодской области (2004 и 2010 гг.) и разработку обоснований включения ряда озерных экосистем в региональную сеть ООПТ. Начало было положено созданием гидрологических заказников в группе карстовых озер Прионежья, уникальность которых подтверждена их многолетним изучением. Новыми объектами исследования биоценозов вологодских озер в последнее десятилетие стали перифитонные цилиосомы и мшанки. Разрабатывается современный подход к природопользованию в условиях хронического и многофакторного влияния хозяйственной деятельности, в том числе

застройки водоохранных зон, основанный на применении концепции экосистемных услуг к озерным экосистемам [Болотова, 2017].

Новым направлением сотрудничества в течение последних 10 лет стали совместные с коллегами из ИНОЗ ежегодные экспедиции по исследованию шхерных районов Ладожского озера, которые инициировали Иван Андреевич Мухин (ВоГУ) и Дина Сергеевна Дудакова (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН). Ежегодно на базе кафедры биологии и химии ВоГУ проводится научно-практический «Ладожский семинар», на котором обсуждаются различные аспекты природопользования, связанные с озером. Результаты исследований биотопов литоральной зоны Ладожского озера докладываются на различных конференциях и вышло более 30 публикаций. Наряду с основной целью исследований – выявлением роли ландшафтных факторов в формировании пресноводных сообществ – реализуются образовательные и методические задачи. В экспедициях и работе семинара участвуют студенты и школьники из разных регионов, расширяется спектр исследователей из других вузов и научных учреждений. Ладожское озеро стало ключевым объектом и для других форм сотрудничества. Так, в рамках гранта ВОО «Русское географическое общество» «Вместе по Русскому Северу-2019: Онежско-Балтийский водный путь» проводились исследования Ладожского озера, связанные с биоиндикацией качества воды. Кроме того, вологодские исследователи опубликовали статью по оценке экосистемных услуг Ладожского озера [Болотова и др., 2022]. Традиционным остается совместное участие в конференциях, проводимых в Вологде и Санкт-Петербурге, в том числе и юбилейной, посвященной 80-летию Института озероведения РАН [80 лет..., 2023]

Заключение

Территория Вологодской области относится к Северо-Западной ландшафтной области, где в краевой зоне последнего оледенения, примыкающей к Прионежской низменности, находится основное количество озер. Как и озера Ленинградской области, они являются озерами северо-западной части Русской плиты, сформировавшимися в зоне избыточного увлажнения. Соответственно, общие зональные закономерности развития озер и проблемы антропогенной трансформации их экосистем предполагают сотрудничество соседних областей в лимнологических исследованиях. Географическое положение территорий,

на которых расположены в настоящее время Вологодская и Ленинградская область, исторически обусловило важную роль Института озероведения в становлении лимнологических исследований в Вологодской области за счет вклада в изучение озер, научного руководства, консультирования, преемственности в подготовке кадров и совместной деятельности. Благодаря разработке Институт озероведения методологических основ лимнологических исследований, а также сотрудничеству в экспедициях с вологодскими коллегами, внесшими собственный вклад в исследования озер, реализован системный подход к изучению особенностей лимнологических процессов на территории Вологодской области.

В результате состояние и изменение озер рассматривается с позиций их эволюционирования в палеолимнологическом аспекте, в рамках ландшафтной обусловленности, взаимодействия «водосбор – озеро», экосистемного подхода при изучении абиотических факторов, структурно-функциональных характеристик всех трофических уровней и закономерностей эвтрофирования. К перспективам дальнейшего сотрудничества следует отнести исследования современного состояния озерных экосистем и изменений лимнологических процессов под влиянием климатических и антропогенных факторов, последствий проникновения чужеродных видов, а также решение проблемы управления озерами и их сохранения на основе внедрения концепции экосистемных услуг.

Литература

- 70 лет Институту озероведения РАН / Отв. ред. В. А. Румянцев, И. С. Трифонова. СПб.: Своеиздательство, 2017. 252 с. doi: 10.12731/978-5-907645-12-7
- 80 лет развития лимнологии в Институте озероведения Российской академии наук / Под ред. С. А. Кондратьева. М.: РАН, 2023. 264 с.
- Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР / Отв. ред. Д. Н. Александрова. Л.: Наука, 1981. Ч. 1. Гидрология и гидрохимия озера Белого. 252 с.; ч. 2. Гидробиология и донные отложения озера Белого. 250 с.
- Арсеньев Ф. А. Водная система герцога Александра Виртембергского // Вологодский сборник. Вологда: тип. Губернского правления, 1879. Т. 1. С. 1–53.
- Болотова Н. Л. Взаимоотношения рыб с кормовой базой малых озер, заселяемых сига́ми: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1986. 18 с.
- Болотова Н. Л. Изменения экосистем мелководных северных озер в антропогенных условиях (на примере водоемов Вологодской области): Дис. ... докт. биол. наук. СПб.: ИНОЗ РАН, 1999. 550 с.
- Болотова Н. Л. О применении концепции экосистемных услуг к водным экосистемам // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 49. С. 113–132.
- Болотова Н. Л., Жаков Л. А. О механизмах регуляции пищевых отношений в малых озерах, заселяемых сига́ми // Трофические связи и продуктивность водных сообществ: Материалы III симп. (Чита, 25–28 сент. 1989 г.). Чита, 1989. С. 14–16.
- Болотова Н. Л., Тихонов С. В. Памяти Л. А. Жакова (15.04.1923 – 17.03.2005) // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: Сб. материалов IV (XXVII) Междунар. конф. (Вологда, Россия, 5–10 декабря 2005 г.). Ч. 1. Вологда, 2005. С. 5–7.
- Болотова Н. Л., Решетников Ю. С., Тихонов С. В. Памяти Льва Андреевича Жакова (15.04.1923–17.03.2005) // Вопросы ихтиологии. 2006. Т. 46, № 1. С. 142–144.
- Болотова Н. Л., Мухин И. А., Лопичева О. Г. Подходы к оценке экосистемных услуг Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 173–187. doi: 10.17076/lim1632
- Воробьев Г. А., Жаков Л. А. Ландшафтные критерии рыбохозяйственной оценки малых озер // Природные условия и ресурсы Севера Европейской части СССР. Вологда: ВГПИ, 1975. С. 68–77.
- Гидробиология озер Воже и Лача: В связи с прогнозом качества вод, перебрасываемых на юг / Ред. И. М. Распопов. Л.: Наука, 1978. 276 с.
- Гидрология озер Воже и Лача (в связи с переброской северных вод в бассейн р. Волги) / Ред. Т. И. Малинина. Л.: Наука, 1979. 288 с.
- Гусаков Б. Л., Дружинин Г. В. Белое озеро: прошлое, настоящее и будущее. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 112 с.
- Данилевский Н. Я. Кубенское озеро // Исследование о состоянии рыболовства в России. Т. VI. Отчет 2. СПб.: Мин-во госимущества, 1862. С. 75–83.
- Жаков Л. А. Численность и структура популяций хищных рыб-аборигенов, как условие, лимитирующее эффект интродукции рыб: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1966. 16 с.
- Жаков Л. А. Состав и сукцессии озерных ихтиоценозов в связи со спецификой фаунистических комплексов рыб // Вопросы ихтиологии. 1974. Т. 14, вып. 2(85). С. 237–248.
- Жаков Л. А. Ихтиоценоз оз. Воже и его рыбохозяйственное использование // Озера Лача и Воже. Л.: Наука, 1975. С. 29–31.
- Жаков Л. А. Ихтиоценоз оз. Воже и его использование // Гидробиология озер Воже и Лача (В связи с прогнозом качества вод, перебрасываемых на юг). Л.: Наука, 1978. С. 179–195.
- Жаков Л. А. Озерные ихтиоценозы Северо-Запада СССР (формирование, структура, моделирование): Дис. ... докт. биол. наук. Л., 1979. 290 с.
- Жаков Л. А. Формирование и структура рыбного населения озер Северо-Запада СССР. М.: Наука, 1984. 144 с.
- Жаков Л. А., Меншуткин В. В. Математическая модель озерного ихтиоценоза // Вопросы ихтиологии. 1974. Т. 14, вып. 3(86). С. 387–395.

Квасов Д. Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.

Кубенское озеро: Материалы комплексных исследований / Отв. ред. И. М. Распопов. Л.: Наука, 1974. 31 с.

Куликовский Г. Зарастающие и периодически исчезающие озера Обонежского края // Землеведение. Кн. 1. М., 1894.

Лебедев В. Г. Ихтиоценоз оз. Кубенского. Его состояние и возможные изменения при зарегулировании стока // Озеро Кубенское. Л.: Наука, 1977. Ч. 3. С. 127–145.

Лебедев В. Г. Формирование ихтиоценоза Кубенского озера и его динамика под влиянием антропогенного фактора // Проблемы исследования крупных озер СССР: Сб. науч. работ. Л.: Наука, 1985. С. 152–155.

Межаков А. П. Кубенское озеро и его рыбные промыслы // Вестн. Императорского Русского географического общества. СПб., 1855. Ч. 15. С. 63–70.

Меншуткин В. В. Лев Андреевич Жаков – ученый, педагог и поэт (воспоминания друга и соавтора) // Экологические проблемы уникальных природных и антропогенных ландшафтов: Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ярославль: ЯрГУ, 2012. С. 17–47.

Меншуткин В. В., Жаков Л. А. Применение математического моделирования в исследованиях по динамике численности популяции окуня // X науч. конф. по внутренним водоемам Прибалтики. Минск, 1963. С. 104–105.

Озера Лача и Воже: Материалы комплексных исследований / Отв. ред. И. М. Распопов и Т. И. Малинина. Л.: Наука, 1975. 36 с.

Озера различных ландшафтов Северо-Запада СССР: Ч. 2: Лимнологическая характеристика озер (гидрохимия, донные отложения, биология): [Сб. статей] / Ред. Н. И. Семенович. Л.: Наука, 1968. 302 с.

Озерные ресурсы Вологодской области / Под ред. А. А. Ляпкиной, Н. Н. Шевелева. Вологда: ВГПИ, 1981. 151 с.

Озеро Кубенское / Отв. ред. Т. И. Малинина и И. М. Распопов. Л.: Наука, 1977. Ч. I. Гидрология. 299 с.; ч. II. Гидрохимия, донные отложения, растительные сообщества. 220 с.; ч. III. Зоология. 168 с.

Остроумов А. А. Систематическое описание сига Кубенского озера // Труды Вологод. молочного ин-та. 1950. Вып. XI. С. 149–166.

Природа Вологодской области / Гл. ред. Г. А. Воробьев. Вологда: Вологжанин, 2007. 434 с.

Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера Европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015. 392.

Рыболовство на Белом и Кубенском озерах: Сб. статей / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т озерного и речного рыбного хозяйства. Вологда: Обл. кн. ред., 1955. 141 с.

Титенков И. С. Кубенская нельма – *Stenodus leucichthys nelma* (Pallas) (биология, условия обитания и хозяйственное значение): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1956. 10 с.

Тихонов С. В. Памяти профессора Льва Андреевича Жакова (15.04.1923–17.03.2005) // Современные проблемы биологии, экологии, химии: Региональный сб. науч. тр. Ярославль: ЯрГУ, 2005. С. 4–8.

Трифонова И. С. Основные этапы развития лимнологии в России до середины XX века // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 115–125. doi: 10.17076/lim746

Филиппов Д. А., Болотова Н. Л. К 100-летию со дня рождения Льва Андреевича Жакова (1923–2005) // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2023. Вып. 102(105). С. 82–90. doi: 10.47021/0320-3557-2023-82-90

References

Aleksandrova D. N. (ed.). Anthropogenic influence on large lakes in the North-West of the USSR. Leningrad: Nauka; 1981. Part 1. Hydrology and hydrochemistry of Lake Beloe. 252 p.; part 2. Hydrobiology and bottom sediments of Lake Beloye. 250 p. (In Russ.)

Arsen'ev F. A. Water system of Duke Alexander of Wirttemberg. *Vologodskii sbornik = Vologda collection*. Vologda: tip. Gubernskogo pravleniya; 1879. Vol. 1. P. 1–53. (In Russ.)

Bolotova N. L. Changes in the ecosystem of shallow northern lakes in anthropogenic conditions (on the example of reservoirs of the Vologda Region): DSc (Dr. of Biol.) thesis. St. Petersburg: INOZ RAN; 1999. 550 p. (In Russ.)

Bolotova N. L., Mukhin I. A., Lopicheva O. G. Approaches to assessing ecosystem services of Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;6:173–187. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1632

Bolotova N. L. On the application of the concept of ecosystem services to aquatic ecosystems. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceedings of the RSHU*. 2017;49:113–132. (In Russ.)

Bolotova N. L. Relationships of fish with the food supply of small lakes inhabited by whitefish: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1986. 18 p. (In Russ.)

Bolotova N. L., Reshetnikov Yu. S., Tikhonov S. V. In memory of Lev Andreevich Zhakov (15.04.1923–17.03.2005). *Voprosy ikhtiologii = Issues of Ichthyology*. 2006;46(1):142–144. (In Russ.)

Bolotova N. L., Tikhonov S. V. In memory of L. A. Zhakov (15.04.1923 – 17.03.2005). *Biologicheskie resursy Belogo morya i vnutrennikh vodoemov Evropeiskogo Severa: Sb. materialov IV (XXVII) Mezhdunar. konf. (Vologda, Rossiya, 5–10 dekabrya 2005 g.) = Biological resource of the White Sea and inland water bodies of the European North: Proceed. IV (XXVII) Int. conf. (Vologda, Russia, Dec. 5–10, 2005). Part 1*. Vologda; 2005. P. 5–7. (In Russ.)

Bolotova N. L., Zhakov L. On the mechanisms of regulation of food relations in small lakes inhabited by whitefish. *Troficheskie svyazi i produktivnost' vodnykh soobshchestv: Materialy III simp. (Chita, 25–28 sent. 1989 g.) = Trophic connections and productivity of aquatic communities: Proceed. of the III Symp. (Chita, Sept. 25–28, 1989)*. Chita; 1989. P. 14–16. (In Russ.)

Danilevskii N. Ya. Lake Kubenskoye. *Issledovanie o sostoyanii rybolovstva v Rossii = Research on the state of fishing in Russia*. Vol. VI. Report 2. St. Petersburg: Min-vo gosimushchestv; 1862. P. 75–83. (In Russ.)

Filippov D. A., Bolotova N. L. To the 100th anniversary of the birth of Lev Andreevich Zhakov (1923–2005). *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod im. I. D. Papanina RAN = Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*. 2023;102(105):82–90. (In Russ.). doi: 10.47021/0320-3557-2023-82-90

Fishery on Lakes Beloye and Kubenskoye: Proceed. All-Union Research Institute of Lake and River Fisheries. Vologda: Obl. kn. red.; 1955. 141 p. (In Russ.)

Gusakov B. L., Druzhinin G. V. White Lake. Past, present and future. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. 112 p. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A. (ed.). 80 years of development of limnology at the Institute of Lake Science of the Russian Academy of Sciences. Moscow: RAN; 2023. 264 p. (In Russ.)

Kulikovskii G. Overgrowing and periodically disappearing lakes of the Obonezh region. *Zemlevedenie = Soil Science*. Book 1. Moscow; 1894. (In Russ.)

Kvasov D. D. Late Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe. Leningrad: Nauka; 1975. 278 p. (In Russ.)

Lebedev V. G. Formation of the ichthyocenosis of Lake Kubenskoye and its dynamics under the influence of anthropogenic factors. *Problemy issledovaniya krupnykh ozer SSSR: Sb. nauch. rabot = Problems of research of large lakes in the USSR: Proceed*. Leningrad: Nauka; 1985. P. 152–155. (In Russ.)

Lebedev V. G. Ichthyocenosis of Lake Kubenskoye. Its state and possible changes during flow regulation. *Ozero Kubenskoe = Lake Kubenskoye*. Leningrad: Nauka; 1977. Part 3. P. 127–145. (In Russ.)

Lyapkina A. A., Shevelev N. N. (eds.). Lake resources of the Vologda Region. Vologda: VGPI; 1981. 151 p. (In Russ.)

Malinina T. I. (ed.). Hydrology of Lake Vozhe and Lacha (in connection with the transfer of northern waters into the Volga River basin). Leningrad: Nauka; 1979. 288 p. (In Russ.)

Malinina T. I., Raspopov I. M. (eds.). Lake Kubenskoye. Leningrad: Nauka; 1977. Part I. Hydrology. 299 p.; Part II. Hydrochemistry, bottom sediments, plant communities. 220 p.; Part III. Zoology. 168 p. (In Russ.)

Malinina T. I., Raspopov I. M. (eds.). Lakes Lacha and Vozhe: Materials of complex research. Leningrad: Nauka; 1975. 36 p. (In Russ.)

Menshutkin V. V. Lev Andreevich Zhakov – scientist, teacher and poet (memoirs of a friend and co-author). *Ekologicheskie problemy unikal'nykh prirodnykh i antropogennykh landshaftov: Mat-ly Vserossiiskoi nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem = Ecological problems of unique natural and anthropogenic landscapes: Proceed. All-Russian sci. pract. conf. with int. participation*. Yaroslavl': YarGU; 2012. P. 17–47. (In Russ.)

Menshutkin V. V., Zhakov L. A. Application of mathematical modeling in research on the dynamics of correlation of perch. *X Nauch. konf. po vnutrennim vodomam Pribaltiki = X scientific. conf. on the inland waters of the Baltic states*. Minsk; 1963. P. 104–105. (In Russ.)

Mezhakov A. P. Lake Kubenskoye and its fisheries. *Vestn. Imp. Russkogo geogr. o-va = Vestn. Imp. Russian Geogr. Soc.* St. Petersburg; 1855. Part 15. P. 63–70. (In Russ.)

Ostroumov A. A. Systematic description of the whitefish of Lake Kubenskoye. *Trudy Vologod. molochnogo in-ta = Tr. Vologda Dairy Institute*. 1950;XI:149–166. (In Russ.)

Raspopov I. M. (ed.). Hydrobiology of Lake Vozhe and Lacha: In connection with the forecast of the quality of the water transferred to the south. Leningrad: Nauka; 1978. 276 p. (In Russ.)

Raspopov I. M. (ed.). Lake Kubenskoye: materials of complex research. Leningrad: Nauka; 1974. 31 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. Lakes of the European part of Russia. St. Petersburg: LEMA; 2015. 392 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Trifonova I. S. (eds.). 70 years of the Institute of Lake Studies of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2017. 252 p. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907645-12-7

Semenovich N. I. (ed.). Lakes of various landscapes of the North-West of the USSR: Part 2: Limnological characteristics of lakes (hydrochemistry, bottom sediments, biology): Proceed. Leningrad: Nauka; 1968. 302 p. (In Russ.)

Tikhonov S. V. In memory of Professor Lev Andreevich Zhakov (15.04.1923–17.03.2005). *Sovremennye problemy biologii, ekologii, khimii: Regional'nyi sb. nauch. tr. = Current problems of biology, ecology, chemistry: Regional proceed*. Yaroslavl': YarGU; 2005. P. 4–8. (In Russ.)

Titenkov I. S. Nelma of Lake Kubenskoye – *Stenodus leucichthys nelma* (Pallas) (biology, habitat conditions and economic significance): Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Leningrad; 1956. 10 p. (In Russ.)

Trifonova I. S. Key development stages of limnology in Russia up to the middle of the 20th century. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2018;9:115–125. (In Russ.). doi: 10.17076/lim746

Vorob'ev G. A. (ed.). Nature of the Vologda Region. Vologda: Vologzhanin; 2007. 434 p. (In Russ.)

Vorob'ev G. A., Zhakov L. A. Landscape criteria for fishery assessment of small lakes. *Prirodnye usloviya i resursy Severa Evropeiskoi chasti SSSR = Natural conditions and resources of the North of the European part of the USSR*. Vologda: VGPI; 1975. P. 68–77. (In Russ.)

Zhakov L. A. Composition and succession of lake ichthyocenoses in connection with the specificity of faunal complexes of fish. *Voprosy ikhtiologii = Issues of Ichthyology*. 1974;14(2-85):237–248. (In Russ.)

Zhakov L. A. Formation and structure of the fish population of the North-West of the USSR. Moscow: Nauka; 1984. 144 p. (In Russ.)

Zhakov L. A. Ichthyocenosis of Lake Vozhe and its fishery use. *Ozera Lacha i Vozhe = Lakes Lacha and Vozhe*. Leningrad: Nauka; 1975. P. 29–31. (In Russ.)

Zhakov L. A. Ichthyocenosis of Lake Vozhe and its use. *Gidrobiologiya ozer Vozhe i Lacha (V svyazi s prognozom kachestva vod, perebrasyvaemykh na yug) =*

Hydrobiology of Lakes Vozhe and Lacha (In connection with the forecast of the quality of the water transferred to the south). Leningrad: Nauka; 1978. P. 179–195. (In Russ.)

Zhakov L. A. Lake ichthyocenoses of the North-West of the USSR (formation, structure, modeling): DSc (Dr. of Biol.) thesis. Leningrad; 1979. 290 p. (In Russ.)

Zhakov L. A., Menshutkin V. V. Mathematical model of lake ichthyocenosis. *Voprosy ikhtiologii = Issues of Ichthyology*. 1974;14(3-86):387–395. (In Russ.)

Zhakov L. A. Number and structure of populations of native predatory fish as a condition limiting the effect of fish introduction: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Leningrad; 1966. 16 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 12.05.2024; принята к публикации / accepted: 06.06.2024.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Болотова Наталья Львовна

д-р биол. наук, профессор кафедры биологии и химии

e-mail: bolotova.vologda@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Bolotova, Natalya

Dr. Sci. (Biol.), Professor

ШКОЛА ПОЛЯРНЫХ ЛИМНОЛОГОВ: ВПЕРВЫЕ ЛЕТНЯЯ

С 30 июня по 6 июля 2024 года в Мурманской области проходила Третья школа-практика полярных лимнологов. Главной особенностью мероприятия стало то, что школа впервые состоялась летом, а не в апреле, когда озера в Арктике еще скованы льдом, как это было в 2021 и 2023 годах.

Третья школа полярных лимнологов традиционно проводилась на берегу озера Имандра в 20 км от г. Апатиты. Сотрудники Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) КНЦ РАН и Института водных проблем Севера (ИВПС) КарНЦ РАН, выступившие организаторами, собрали в Мурманской области интересующихся озерами людей из разных регионов России. В этом году были участники из Москвы, Санкт-Петербурга, Петрозаводска, Мурманска, Вологды, Архангельска, Кандалакши, Апатитов, Ростова-на-Дону, Ханты-Мансийска и станицы Северной Краснодарского края. Следует также отметить, что Третья школа-практика полярных лимнологов стала международной благодаря участию в ней студентки Санкт-Петербургского университета и гражданки Китая Ине Ма.

В первый день мероприятия перед участниками с приветственным словом выступили директор ИППЭС КНЦ РАН д. т. н. Д. В. Макаров, руководитель лаборатории географии и гидрологии ИВПС КарНЦ РАН к. г. н. А. В. Толстиков и ведущий научный сотрудник лаборатории водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН к. б. н. Д. Б. Денисов. И начались трудовые будни школы, состоявшие из лекций ведущих ученых-лимнологов из Апатитов, Петрозаводска и Санкт-Петербурга, а также практических занятий на воде и в лабораторных условиях.

Лекции, как обычно, были посвящены разным аспектам исследования водных объектов на Севере России. Слушатели школы узнали о гидрохимических, геохимических, геофизических, гидробиологических методах изучения озер. Ученые рассказали будущим лимнологам о том, какие рыбы водятся в водоемах Мурманской области, чем лучше всего отбирать донные отложения озер, какие загрязнители могут поступать в водную среду от промышленных предприятий и транспорта, опасен ли микропластик для обитателей озер и о многом другом. Каждая лекция заканчивалась вопросами от слушателей школы.

Главным полевым полигоном для практических занятий стало озеро Имандра, на берегу которого жили и работали участники школы лимнологов все дни мероприятия. Например, в ходе работы на водоеме слушатели научились работать с батометром, прибором для отбора проб воды, дночерпателем, планктонной сеткой для сбора биологического материала, диском Секки для измерения прозрачности воды и другим оборудованием, используемым при изучении озер. Специальные рейсы на лодке были проведены для измерения температуры и электропроводности по всей акватории залива, где проходила школа-практика.

После двух насыщенных работой дней в середине недели для участников школы-практики была устроена культурная программа. Новопеченные лимнологи посетили музей Кольского научного центра «Хибинариум» в городе Апатиты, а также прогулялись по экологической тропе Полярно-альпийского ботанического сада-института КНЦ РАН в городе Кировске,



Школа-практика традиционно проводится на базе гостиницы «Тигетта»



Д. Б. Денисов демонстрирует работу батометра



На лекции



Озеро Имандра

где смогли больше узнать о природе Мурманской области и насладиться видами Хибинских гор. Такие мероприятия стали обязательной частью программы каждой школы лимнологов, учитывая тот факт, что многие из участников впервые посещают арктический регион.

В четвертый день мероприятия участники работали в мини-группах, разделившись по научным интересам на гидрохимиков, гидрофизиков, гидробиологов и ихтиологов. Кураторами групп выступили опытные ученые-лимнологи, которые ранее читали участникам лекции об исследовании озер. В ходе групповых работ специалисты научили слушателей школы измерять физико-химические параметры воды и донных отложений портативными приборами, определять живые организмы под микроскопом и биноклем, анализировать гидрофизические данные с помощью специальных программ на компьютере и другим полезным для лимнологов навыкам обработки полевых материалов. В завершающий день школы участники сделали доклады в виде презентаций, показав, чему научились за это время, после чего получили сертификаты об участии, подтверждающие их новый статус лимнологов.

Разъезжаясь по домам, участники сожалели, что время пролетело слишком быстро. Однако у каждого, кто побывал в Апатитах в этом году и приезжал ранее, остались важные знания, навыки, которые обязательно пригодятся в будущем. Об этом, в частности, можно судить по отзывам ребят, которые они оставили по возвращении домой:

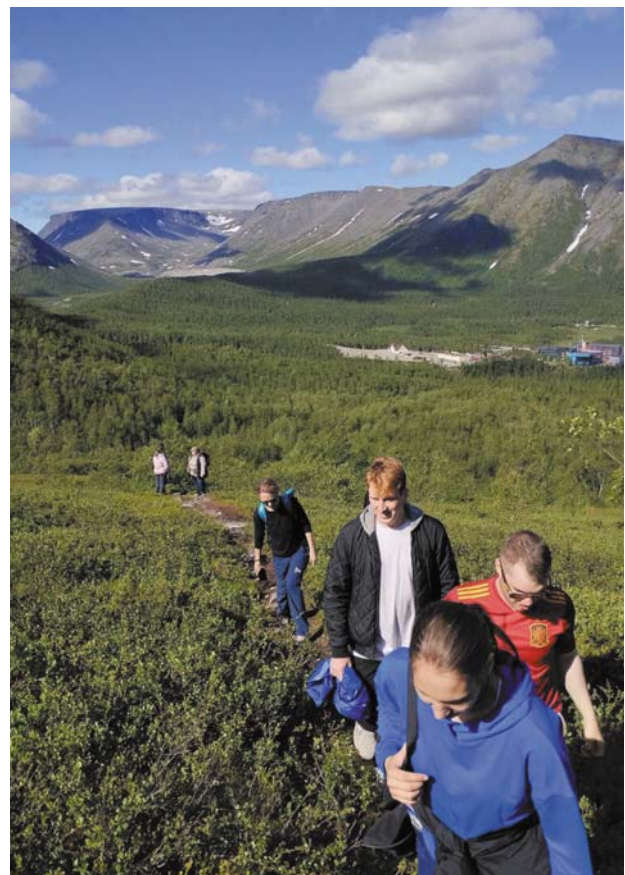
«На школе я познакомился со многими очень интересными людьми, которые были объединены общей страстью – озерами. В таком коллективе было приятно работать. Тем более поработать было над чем: опытные наставники, влюбленные в свое дело, показали много методов полевой работы, помогли собрать отличный материал, который может пригодиться и для будущих исследований» (Роман Иванченко, Мурманск).

«Начну с того, что участие в школе-практике – это подарок моих друзей на день рождения. Я далека от науки в ее классическом понимании, тем более от лимнологии, но мне всегда интересно узнавать новое, саморазвитие и получение новых знаний очень важно в моей профессии – я педагог дополнительного образования. В новом учебном году открою для обучающихся мир водных объектов с другой стороны» (Любовь Мацеева, Кандалакша).

«Школа полярных лимнологов уникальна благодаря своей обширной практической составляющей. Как и каждым участником школы,

мною был пройден полный цикл обучения: лекции, отбор проб на водном объекте, первичный лабораторный анализ, статистическая обработка полученных результатов и их представление в виде доклада с дискуссией. Хочется отметить, что также очень ценно общение с опытными учеными в неформальной обстановке. Лично убедился, что это очень эффективный формат передачи знаний и навыков, некоторые из них планирую применить в своей кандидатской диссертации» (Алексей Сазонов, Ростов-на-Дону).

«Когда собиралась на школу-практику полярных лимнологов, не строила никаких ожиданий, так как это мой первый опыт подобного участия. Но если бы они были – реальность их точно бы превзошла! В первую очередь мне было интересно познакомиться с методами, приборами и спецификой современных лимнологических исследований в полярных широтах и сопоставить с моими знаниями о палеолимнологических исследованиях, чтобы еще лучше понимать процессы, отражение которых мы наблюдаем в палеоархивах. Эта задача была успешно выполнена в рамках лекций и насыщенной практической части, на которой очень



В Хибинах

подробно специалисты показывали приборы, а каждый участник имел возможность самостоятельно познакомиться с материалом и позже изучить в рамках подготовки доклада в группах, что, безусловно, позволило закрепить полученные знания и навыки на месте» (Дарья Левкова, Санкт-Петербург).

«Прежде всего, хочу поблагодарить организаторов школы и всех участников за теплую атмосферу и живое общение! Приятно было провести время среди людей с общими интересами. Полезно было сравнить подходы

в работе со своими, под другим углом посмотреть на проблемы, расширить свои знания, что-то взять на заметку, где-то удостовериться в верности своих суждений, а в каких-то случаях и получить ответы на давние вопросы. Для меня это была неделя не только работы с коллегами, но и отдыха в приятной компании и в удивительно живописном месте» (Надежда Макарёнкова, Вологда).

З. И. Слуковский.

Фото из архива участников школы

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, утраты науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются электронная версия статьи, которую авторы вычитывают и заверяют.

Журнал имеет систему электронной редакции на базе Open Journal System (OJS), позволяющую вести представление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронном формате и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Содержание выпусков Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные версии статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word в систему электронной редакции на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо высылаются на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, 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 клейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо первым словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации.

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы могут быть снабжены указанием желательного размера рисунка, пожеланиями и требованиями к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с картой более мелкого масштаба, где обозначен представленный на основной карте участок.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточную информацию для того, чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. Названия таксонов рода и вида даются курсивом. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательным годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicus* (Gmelin, 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все прочие сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. Располагаются после основного текста статьи отдельным абзацем, в котором авторы выражают признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и организациям, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ. При подаче статьи авторы должны раскрыть потенциальные конфликты интересов, которые могут быть восприняты как оказавшие влияние на результаты или выводы, представленные в работе. Если конфликт интересов отсутствует, следует об этом сообщить в отдельной формулировке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Источники располагаются в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами авторов ставится пробел.

REFERENCES. Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические записи источников оформляются согласно стилю Vancouver (см. примеры в ГОСТ Р 7.0.7-2021 и образцы ниже) и располагаются в алфавитном порядке. Заголовки русскоязычных работ приводятся на английском языке; для журналов и сборников, в которых размещены цитируемые работы, указывается параллельное английское наименование (при его наличии) либо русскоязычное наименование приводится в латинской транслитерации (вариант BSI) с переводом на английский язык. Прочие элементы библиографической записи приводятся на английском языке (русскоязычное название издательства транслитерируется). При наличии переводной версии источника в References желательно 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 Dulldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // *Entomologica Fennica*. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

References:

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews*. 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

Литература:

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)*. Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Литература:

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

Литература:

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

References:

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

Литература:

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

References:

Grebenshchikov Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

Ссылки на интернет-ресурсы

Литература:

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
No. 5, 2024
“LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY” Series

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

- N. Yu. Korneenkova, M. A. Naumenko. MORPHOMETRIC FEATURES OF THE RELIEF AND DISTRIBUTION OF LAKES IN LAKE LADOGA CATCHMENT 5

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

- E. A. Vakhrameeva, T. A. Zhibareva. DISTRIBUTION OF THE PARTICLE-SIZE COMPOSITION, ORGANIC MATTER AND IRON IN BOTTOM SEDIMENTS OF KONDOPOGA BAY (LAKE ONEGO) 18

- K. V. Titova, N. M. Kokryatskaya. BIOGEOCHEMICAL PROCESSES IN SEDIMENTS OF LAKES IN THE KENOZERSKY NATIONAL PARK 28

- E. S. Kolpakova, A. V. Velyamidova, T. A. Koroleva. ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN THE WATER OF LAKES AT DIFFERENT STAGES OF ISOLATION FROM THE WHITE SEA 45

- N. E. Galakhina, M. B. Zobkov. CURRENT NUTRIENT LOAD ON LAKE ONEGO FROM ITS LARGEST TRIBUTARIES 53

- G. T. Frumin, A. S. Demeshkin. DYNAMICS OF THE TROPHIC STATUS OF LAKE BIENDA-STEMME (WEST SPITSBERGEN) 62

- A. V. Sabylina, T. A. Efremova, O. I. Ikko. CONTENT OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS IN THE HYDRO-CRYOGENIC SYSTEM OF LAKE ONEGO 69

HYDROBIOLOGY

- E. I. Sobko, S. I. Klimov, N. V. Neverova, O. Yu. Moreva. COMPOSITION AND STRUCTURE OF UNDER-ICE ZOOPLANKTON OF DIVERSE LAKES IN KENOZERSKY NATIONAL PARK (ARKHANGELSK REGION) 83

RESEARCH METHODS

- Yu. N. Lukina, N. A. Belkina, N. M. Kalinkina, S. R. Bogdanov, M. B. Zobkov, R. E. Zdorovenov, M. S. Potakhin, G. E. Zdorovenova, A. V. Tolstikov, N. I. Palshin, G. S. Borodulina, M. S. Bogdanova, N. A. Myasnikova, S. I. Smirnov, Yu. S. Novikova, E. V. Gatal'skaya, I. V. Morozova, M. V. Zobjkova, Yu. L. Slastina, E. M. Makarova, M. T. Syarki, D. S. Konovalov, E. V. Tekanova. DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING CARBON POOLS AND GREENHOUSE GAS FLOWS IN AQUATIC ECOSYSTEMS OF THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA 97

HISTORY OF SCIENCE

- D. D. Kuznetsov. PALEOLIMNOLOGICAL RESEARCH AT THE INSTITUTE OF LIMNOLOGY RAS IN THE LAST DECADE – THE LITHOSTRATIGRAPHIC ASPECT 115

A. V. Ludikova. 60 YEARS OF STUDYING SEDIMENTARY DIATOMS IN LAKE LADOGA. WHAT NEW CAN BE REPORTED ABOUT THE EVOLUTION AND THE CURRENT STATE OF THE LARGEST EUROPEAN LAKE?	128
N. L. Bolotova. LIMNOLOGICAL RESEARCH IN THE VOLOGDA REGION AND THE ROLE OF THE INSTITUTE OF LIMNOLOGY IN ITS FORMATION	143
CHRONICLE	
Z. I. Slukovskii. Polar Limnologists School: the first time in summer	155
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	160

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 5, 2024

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 8 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Л. Э. Бюркланд

Подписано в печать 27.09.2024. Дата выхода 30.09.2024. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 18,8. Усл. печ. л. 19,5.
Тираж 100 экз. Заказ 820. 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