Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 97–114
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2024. No. 5. P. 97–114
DOI: 10.17076/lim1954

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. Калинкина, С. Р. Богданов, М. Б. Зобков, Р. Э. Здоровеннов, М. С. Потахин, Г. Э. Здоровеннова, А. В. Толстиков, 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, pH, 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., Калинкина Н. М., Богданов С. Р., Зобков М. Б., Здоровеннов Р. Э., Потахин М. С., Здоровеннова Г. Э., Толстиков А. В.,

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

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. Zdorovennov, M. S. Potakhin, G. E. Zdorovennova, 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., Zdorovennov R. E., Potakhin M. S., Zdorovennova 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 «карбоноцентричной 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, заглубление 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

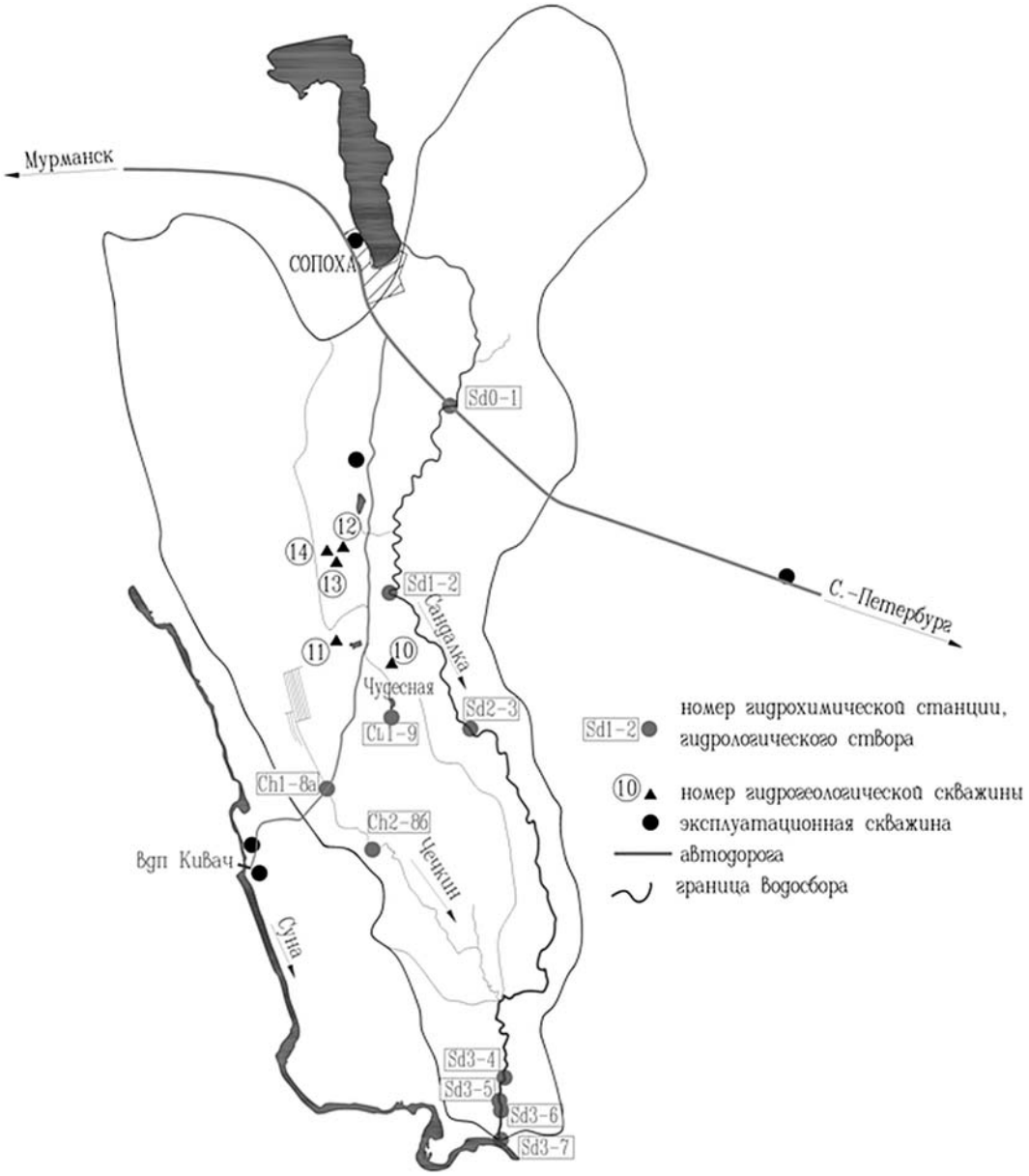


Рис. 1. Схема водосборов реки Сандалка и ручья Чечкин. Положение озера Чудесная ламба. Местоположение створов, скважин и станций измерений

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 среднещелочностным 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 среднещелочностным слабокислым нейтральным, полигумусные, мезотрофные; по главным ионам – к гуматному типу, группе кальция, магния. Согласно расчету, водосбор р. Сандалка, включая руч. Чечкин, составляет 48 км^2.

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, $БПК_5$) и формы углерода в воде (TC, TOC, DOC, POC, IC, гумусовые вещества), ионный состав (pH, электропроводность, Na^+, K^+ Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-, HCO_3^-), биогенные элементы ($P_{мин}$, $P_{общ}$, TN, NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, SiO_2), газовый состав воды (O_2, CO_2, H_2S), 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 а* 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 *а* в пробах воды определяли спектрофотометрическим методом [SCOR-UNESCO..., 1966].

Зоопланктон облавливался сетным методом по слоям. Использовалась сеть Джеди 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 допплеровский 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 Вяйсяля – 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

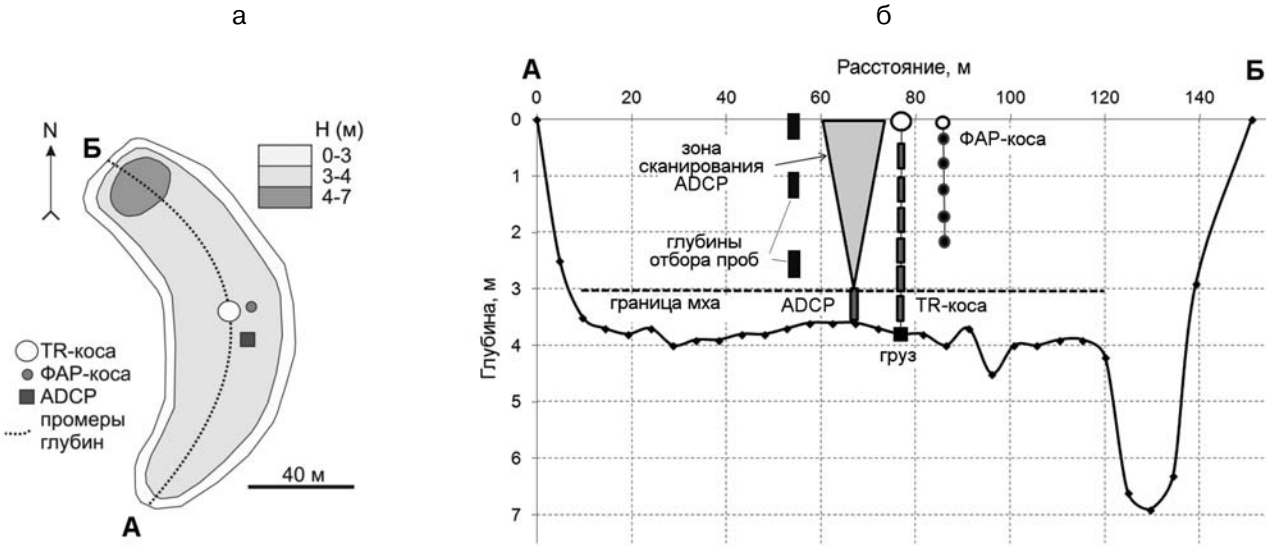


Рис. 2. Схема распределения глубин в оз. Чудесная ламба и положение разреза **А**–**Б** и приборов (а); распределение глубин по разрезу **А**–**Б**, положение приборов и верхней границы зарослей мха (б)

Fig. 2. Scheme of depth distribution in Lake Chudesnaya Lamba and the position of section **А**–**Б** and instruments (a); 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 (pH, 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 [Дементьев 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 якоре 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 завинчивают 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 м^2 площади дна. В июне интенсивность потока газа уменьшилась и составила 46 мг CO_2 на м^2 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 м^2 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



а б

Рис. 3. Внешний вид поверхностной накопительной камеры-ловушки объемом 7 л, площадь основания 630 см^2 (а):

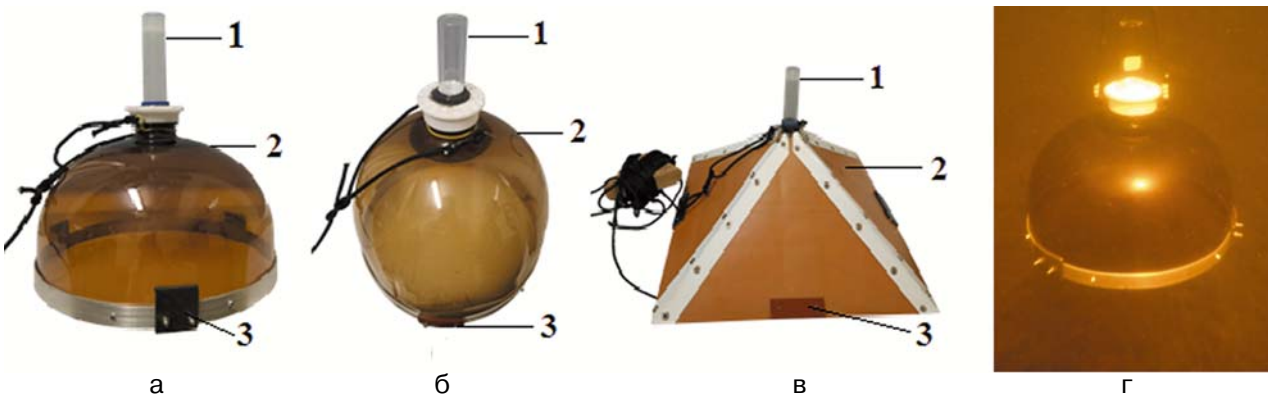
1 – отверстие для отбора газа шприцем (для газохроматографического анализа), 2 – камера-ловушка, 3 – груз, 4 – отверстие для газового датчика или для отбора большого объема газа из ловушки;

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 cm^2 (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 (б)



а б в г

Рис. 4. Внешний вид накопительных камер-ловушек: а – донная накопительная полусферическая объемом 7,6 л, площадь основания 660 см^2; б – донная накопительная полусферическая объемом 11,7 л, площадь основания 660 см^2; в – донная накопительная пирамидальная объемом 20 л, площадь основания 2500 см^2 (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-trapwith a volume of 7.6 l, base area of 660 cm^2; б – bottom accumulation hemispherical chambers-trapwith a volume of 11.7 l, base area of 660 cm^2; в – bottom accumulation pyramidal chambers-trapwith a volume of 20 l, base area of 2,500 cm^2 (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 залегает 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 водопроводимостью 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·км^2, 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, pH 7,22. Вода глубоких скважин, вскрывающих водоносный горизонт подстилающих коренных пород, более минерализована – до 0,46 г/л, возрастает доля хлоридов. Величина pH достигает значения 8,15, вода лишь одной скважины в верховье р. Сандалка имеет pH 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 pH 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 CO_2 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 CO_2 (до 95 %) находится в агрессивной форме [Шварцев, 1998]. Растворение карбонатов и гидролиз алюмосиликатов происходит по обобщенным схемам:

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 = Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

$$2Ca[Al_2Si_2O_8] + 6H_2O = [Al_4Si_4O_{10}](OH)_8 + 2Ca^{2+} + 4OH^-.$$

Вся активность OH-, формирующаяся при разложении силикатов, преобразуется в HCO_3^-:

$$OH^- + CO_2 = HCO_3^-.$$

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 CO_2. 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 CO_2 составляет 14 % от ТС (5,1 мгС/л), и резкое падение доли неорганического углерода в период весеннего половодья, сопровождаемое снижением концентрации CO_2. 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 превалировали 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/м^2 в сутки и в среднем за изучаемый период для замыкающего створа изучаемого водосбора (устья р. Сандалка) составлял примерно 0,1 гС/м^2 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 заглубления 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/м^2, 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/(м^2·с), на глубине 2,25 м редко превышала 20–30 мкмоль/(м^2·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$^{-1}$.

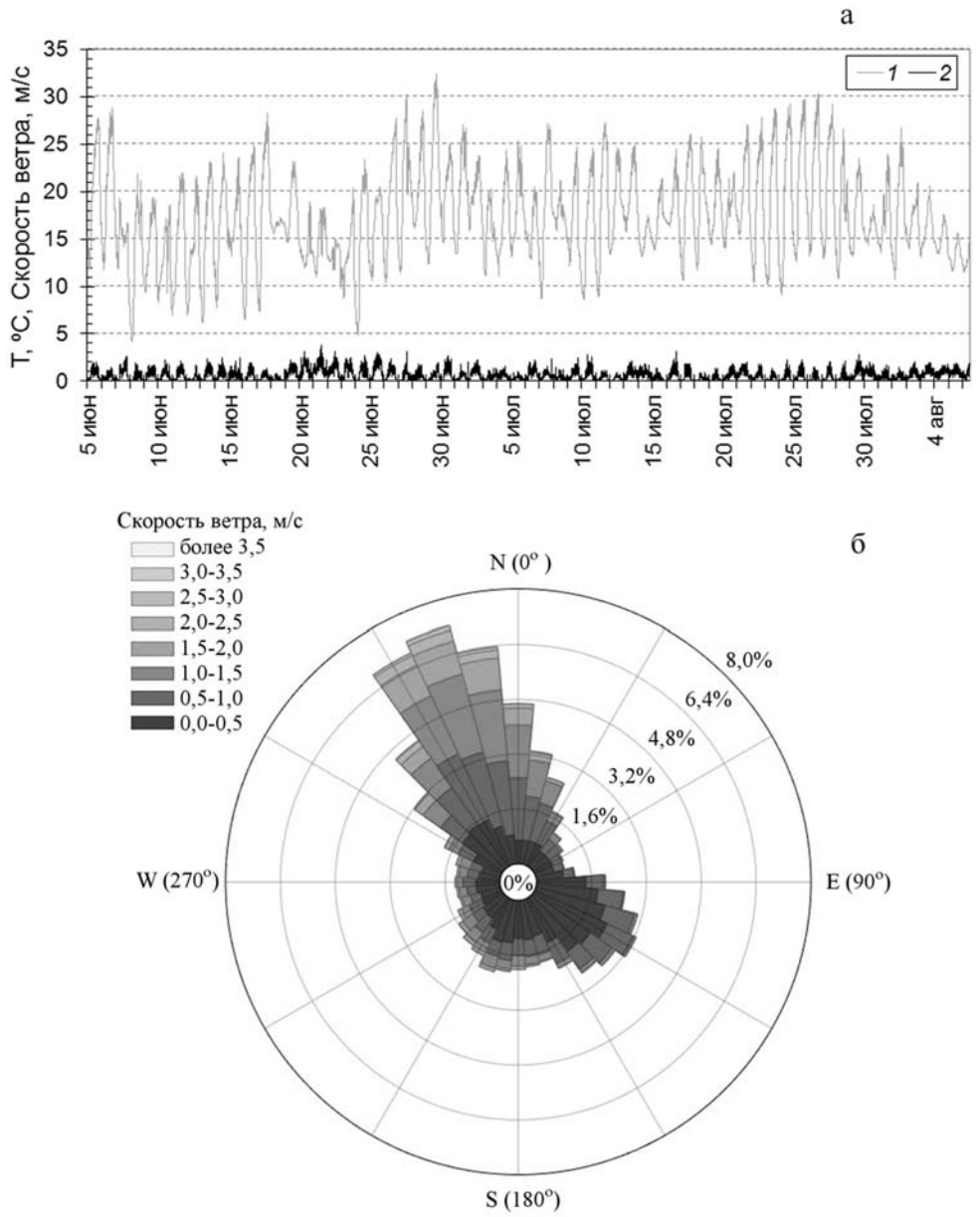


Рис. 5. Скорость ветра, измеренная на метеостанции на берегу озера Чудесная ламба в июне–июле 2024 г. (а); роза ветров за июнь–июль 2024 г. (б)

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 м^3/с, при этом в период половодья, пик которого пришелся на начало апреля, расход воды поднимался до максимума 3,3 м^3/с. В руч. Чечкин расход составлял 0,01 м^3/с в период межени, 1,7 м^3/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/м^3, в июне – 3,83 млн кл./мл и 0,52 г/м^3, в июле – 2,85 млн кл./мл и 0,45 г/м^3 соответственно.

Высокие показатели TOC (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/м^3 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*, образовывавшие 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/м^3 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 копеподитные 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 копеподитные 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 ацидной мезогумозной Чудесной ламбе хорошо соотносятся с выявленными закономерностями развития планктонных сообществ в лесных разнотипных ацидных 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 %, $C_{орг}$ 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 %, $C_{орг}$ – от 1 до 50 %).

В голоцене водоем становится накопителем ОВ: содержание $C_{орг}$ колеблется в пределах 47–58 %, ППП – 92–96 %. Значительно изменяется качественный состав ОВ, захороненного в ДО озера: от планктоногенного (где C/N = 13 и C/P = 48) до осадков смешанного генезиса с высокой долей высшей водной и наземной растительности (где C/N изменяется от 18 до 104 и C/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 $C_{орг}$ 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 $C_{орг}$. 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 $C_{орг}$ 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 аккумулированных органических осадков (со средним содержанием $C_{орг}$ = 50 %), сформированных в голоцене, не превышает 2 м. Скорость накопления углерода низкая и составляет около 1 кг $C_{орг}$ 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 ацидных 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 ^{13}C 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 CO_2, CH_4 and N_2O 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., Zdorovennov R. E., Mitrokhov A. V., Kuznetsov P. S., Novikova Yu. S., Zdorovennova 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 Northwestern Prionezhye in the Quaternary period. *Trudy Karel'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 ^{13}C 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., Krasyukov 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 CO_2, CH_4 and N_2O 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

Потахин 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