

УДК 551.89

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА ЧУДЕСНАЯ ЛАМБА (ЗАПОВЕДНИК «КИВАЧ»)

М. С. Потахин¹, Н. А. Белкина¹, М. С. Богданова¹, Н. А. Мясникова¹,
И. В. Морозова¹, Е. В. Гатальская¹, А. В. Орлов^{1,2}, А. В. Пронина^{1*}

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*anastasiya.2802@mail.ru

² Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
(наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186)

Одной из причин потепления климата, наблюдаемого в последние десятилетия, является увеличение в атмосфере концентрации парниковых газов. Среди них ведущая роль принадлежит CO₂, посредством которого осуществляется перенос углерода между различными резервуарами планеты (литосфера, биосфера, атмосфера, гидросфера). Наземные водные экосистемы одновременно являются приемниками, преобразователями, накопителями и экспортерами терригенного и атмосферного углерода. Оценить аккумулирующую способность озера по отношению к углероду и ее изменения на разных этапах развития экосистемы водоема можно на основе изучения кернов донных отложений. В статье представлены результаты исследования донных отложений озера Чудесная ламба (заповедник «Кивач») и выявлены особенности накопления C_{орг}. По результатам литологического, гранулометрического и геохимического состава образцов были выделены три горизонта в разрезе донных отложений, которые свидетельствуют о последовательной смене седиментационных обстановок в истории озера, произошедших при изменении климата и накоплении минерального, органо-минерального и органогенного осадочного вещества. Горизонт I (7,50–7,33 м) представлен донными отложениями, накопленными в период Онежского приледникового озера, они имеют минеральный характер. Горизонт II (7,33–7,26 м) – осадки, формировавшиеся в период климатических изменений после изоляции озера от Онежского приледникового озера, отличаются значительным градиентом концентраций органического вещества. Горизонт III (7,26–7,10 м) формировался в голоцене, в это время водоем становится накопителем органического вещества. Полученная информация о содержании и особенностях накопления органического вещества в донных отложениях озера Чудесная ламба вместе с использованием балансовой модели потоков органического вещества в трофических сетях позволят рассчитать баланс углерода в экосистеме модельного водоема и разработать прогнозные оценки потоков CO₂ с поверхности воды в зависимости от химического состава воды и географического положения водоема.

Ключевые слова: водные экосистемы; донные отложения озер; баланс углерода; реконструкция накопления органического вещества

Для цитирования: Потехин М. С., Белкина Н. А., Богданова М. С., Мясникова Н. А., Морозова И. В., Гатальская Е. В., Орлов А. В., Пронина А. В. Особенности накопления органического вещества в донных отложениях озера Чудесная ламба (заповедник «Кивач») // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 62–73. doi: 10.17076/lim2028

Финансирование. Исследование выполнено в рамках ВП ГЗ «Российская система климатического мониторинга».

**M. S. Potakhin¹, N. A. Belkina¹, M. S. Bogdanova¹, N. A. Myasnikova¹, I. V. Morozova¹, E. V. Gatal'skaya¹, A. V. Orlov^{1,2}, A. V. Pronina^{1*}.
SPECIFIC FEATURES OF ORGANIC MATTER ACCUMULATION IN BOTTOM
SEDIMENTS OF LAKE CHUDESNAYA LAMBA (KIVACH NATURE RESERVE)**

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *anastasiya.2802@mail.ru

² Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Moika River Emb., 191186 St. Petersburg, Russia)

One of the causes of climate warming observed in recent decades is the increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, where the leading role is played by CO₂, through which carbon is transferred between different reservoirs of the planet (lithosphere, biosphere, atmosphere, hydrosphere). Terrestrial aquatic ecosystems are simultaneously receivers, converters, accumulators and exporters of terrigenous and atmospheric carbon. It is possible to estimate the accumulating capacity of a lake in relation to carbon and its changes at different stages of the water body ecosystem development on the basis of the study of bottom sediment cores. The article presents the results of a study of bottom sediments of Lake Chudesnaya Lamba (Kivach Nature Reserve) and reveals the specific patterns of total organic carbon accumulation. Based on the lithological, grain-size and geochemical composition of samples, three horizons were distinguished in the sediment profile, illustrating the successive change of the sedimentation environment in the lake's evolution, which occurred during climate change and accumulation of mineralogenic, organo-mineralogenic and organogenic sedimentary matter. Horizon I (7.50–7.33 m) is represented by sediments of mineral nature accumulated during the Onego Ice Lake period. Horizon II (7.33–7.26 m) is sediments formed during the period of climate changes after the separation of the lake from the Onego Ice Lake, which are characterized by a significant gradient of organic matter concentrations. Horizon III (7.26–7.10 m) was formed in the Holocene, at which time the reservoir became an accumulator of organic matter. The new information on the content and specific features of organic matter accumulation in Lake Chudesnaya Lamba sediments, along with the use of the balance model of organic matter fluxes in trophic networks, will make it possible to calculate the carbon balance in the ecosystem of the model lake and to produce predictive estimates of CO₂ fluxes from the water surface depending on the chemical composition of water and the geographical location of the lake.

Keywords: aquatic ecosystems; lake sediments; carbon balance; reconstruction of organic matter accumulation

For citation: Potakhin M. S., Belkina N. A., Bogdanova M. S., Myasnikova N. A., Morozova I. V., Gatal'skaya E. V., Orlov A. V., Pronina A. V. Specific features of organic matter accumulation in bottom sediments of Lake Chudesnaya Lamba (Kivach Nature Reserve). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 62–73. doi: 10.17076/lim1936

Funding. The research was carried out within the Key Innovative Project of State Importance «Russian Climate Monitoring System».

Введение

Изменение глобального климата в последние десятилетия связывают с резким увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере. Необходимость определения степени значимости этого процесса и его контроля обозначает проблему оценки масштабов поступления парниковых газов в атмосферу из разных источников. Наземные водные экосистемы представляют собой важный источник диоксида углерода.

Донные отложения являются одной из сред, депонирующих органическое вещество в озере. В настоящее время озерные системы, функционирующие в условиях гумидного климата, рассматриваются как приемник стока углерода, полученного наземными экосистемами из атмосферы [Biskaborn, 2016; Pfalz et al., 2023; Белкина, 2024], однако роль донных отложений как накопителя органического вещества на сегодняшний день недостаточно оценена.

Донные отложения, формирующиеся в процессе эволюции озера и его водосбора под влиянием изменения климата, хранят существенную информацию о событиях глобального и регионального уровней, в том числе и об изменении потоков углерода в системе «водосбор – водоем – атмосфера». С точки зрения цикла углерода процесс формирования донных отложений в континентальном водоеме можно рассматривать как переход углерода из биологического круговорота в геологический. В результате этого процесса происходит закрепление углерода в осадочных отложениях на тысячелетия, что обосновывает необходимость оценки накопления органического вещества в донных осадках.

Данное исследование проведено в рамках разработки системы мониторинга парниковых газов в озерно-речных системах Российской Федерации, которая обеспечит оценку вклада пресноводных экосистем (в том числе донных отложений) в глобальную структуру бюджета углерода [Лукина и др., 2024]. Для изучения этой системы был выбран модельный объект, расположенный в южной части Карелии: озеро Чудесная ламба.

В ходе исследования изучена ландшафтная структура водосборной территории модельных водных объектов, определены гранулометрический и химический состав донных отложений, сопоставлены результаты проведенных анализов, выполнена палеогеографическая реконструкция развития седиментогенеза озера Чудесная ламба и выявлены особенности накопления органического вещества со времени дегляциации территории.

Характеристика района и объекта исследования

Формирование донных отложений озер Карелии в настоящее время происходит в условиях умеренного влажного климата. Пребывание воды в течение года преимущественно в жидком фазовом состоянии создает предпосылки для множества процессов физической, химической и биологической дифференциации вещества на всех стадиях озерного седиментогенеза. Углерод поступает в донные отложения в составе детрита и нерастворимых гумусовых веществ.

В настоящее время на территории Южной Карелии доминируют озера со смешанным типом седиментогенеза: железо-кремне-гумусовым, железо-гумусо-кремниевым или гумусо-железо-кремниевым. Мобилизация, транспортировка и осаждение элементов, имеющих химическое сродство к силикатным минералам, гумусу и железу (Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Sr, Ni, Mo, Co, S, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sn, Sb, Pb), контролируются особенностями поведения в водной среде основных компонентов донных отложений (кремния, железа и органического вещества). Редкие (рассеянные) элементы поступают в донные отложения с обломочным материалом. Неравномерное распределение и разнообразие осадков определяются зональными (ландшафтно-климатические условия) и азональными (геологические условия водосборных территорий, морфология озерных котловин, антропогенная нагрузка) факторами [Белкина, 2021].

Озеро Чудесная ламба расположено на Северо-Западе России, в южной части Республики Карелия, в пределах ФГБУ «Государственный заповедник «Кивач» (рис. 1) (координаты географического центра озера 62°17' с. ш. 34°01' в. д.). Площадь озера составляет 0,00686 км², длина около 160 м, ширина – 50 м, средняя глубина 4,9 м, наибольшая глубина 8,9 м.

Первые исследования озера и окружающего его болота проводились в 1960–70-х гг., тогда были изучены ботанический состав торфа и дно котловины. В 2016 и 2017 гг. изучен ботанический состав образцов органических отложений [Кутенков, 2021].

Изучение особенностей ландшафтной структуры водосбора и его окрестностей проводилось на ключевом участке площадью 130 га (1,3 км²) с применением ландшафтно-динамического подхода [Исаченко, 1998]. На основе анализа ландшафтных данных, полученных при полевых исследованиях для территории ключевого участка, разработана типология местоположений, а также составлена ландшафтная карта водосбора озера Чудесная ламба и его окрестностей (рис. 2).



Рис. 1. Район исследования
Fig. 1. Study area

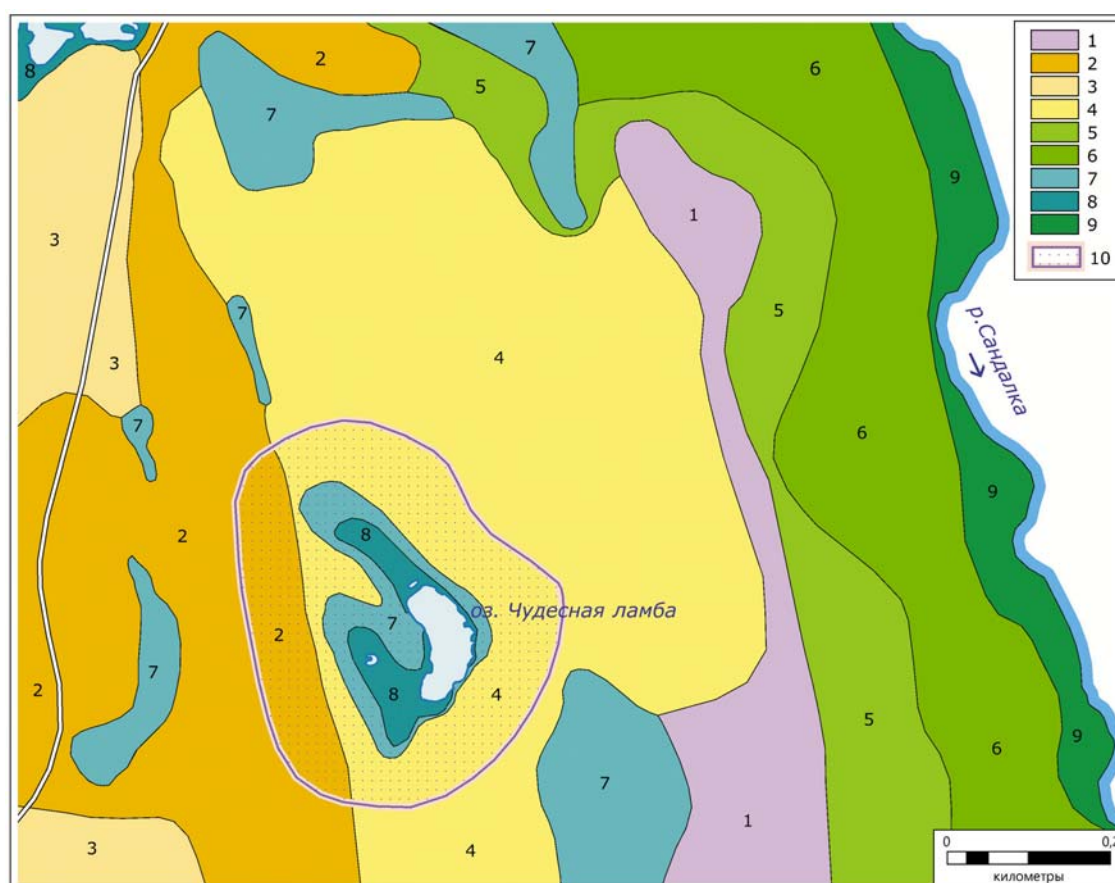


Рис. 2. Карта ландшафтной структуры водосбора и окрестностей озера Чудесная ламба (легенда карты с описанием местоположений 1–9 приведена в Приложении), 10 – водосбор озера Чудесная ламба

Fig. 2. Map of the landscape structure of the catchment and surroundings of Lake Chudesnaya Lamba (map legend with the explanation of landscape sites and long-term states 1–9 is given in Appendix), 10 – Lake Chudesnaya Lamba catchment area

Площадь водосбора озера Чудесная ламба (с учетом акватории) составляет 13,8 га (0,138 км²). На территории выделяется 4 вида местоположений. Подсчет площадей местоположений по составленной ландшафтной карте показал, что на водосборе абсолютно преобладают дренированные равнины на безвалунных песках (51 %). На них произрастают спелые и старовозрастные сосновые лишайниковые, кустарничково-лишайниковые и кустарничково-лишайниково-зеленомошные леса на маломощных грубогумусных песчаных подзолах и оподзоленных грубогумусных почвах. Более 20 % водосбора приходится на дренированные вершины и восточные склоны средней крутизны (5–25°) крупной озовой гряды, сложенной песчано-галечно-валунными отложениями. Часть склонов перекрыта безвалунными тонкозернистыми песками, часть – галечными и мелкогалечными песками, также на поверхности склонов встречаются крупные валуны. На озовой гряде произрастают преимущественно сосновые кустарничково-зеленомошные леса, на террасированных склонах – елово-сосновые чернично-зеленомошные леса, иногда встречаются группировки из ельников мертвопокровных, а также ельники с примесью березы. Почвенный покров в отличие от дренированных равнин достаточно разнообразен – грубогумусные оподзоленные почвы, подзолы разной мощности и подбуры.

Доля торфяников (заболоченность водосбора) составляет 23 %. Большая часть из них (14 %) представлена низкостебельными редкостойными сосновыми болотно-кустарничково-сфагновыми лесами и пушицево-кустарничково-сфагновыми верховыми болотами с сосной. Олиготрофные торфяники с участками грядово-озерковых комплексов состоят из небольших гряд или кочек, покрытых болотнокустарничково-сфагновой растительностью, часто с угнетенными или сухими соснами, и мочажин с очеретниково-сфагновыми топями, а также окнами с разреженным сфагновым покровом и водой. Берега озера Чудесная ламба – пушицево-кустарничково-сфагновые сплавины.

На территории ключевого участка отмечены следы прошлого антропогенного воздействия: окопы времен Великой Отечественной войны, углежогные ямы времен Кончезерского меде- и чугуноплавильного завода, а также следы подпочки для сбора живицы. В настоящее время антропогенное воздействие на ландшафты не наблюдается.

Для малых озер Карелии разнообразие седиментационных обстановок связано с локальными ландшафтными условиями водосборов.

Наиболее важными его характеристиками в равной мере являются химический состав воды, площадь водосбора и рельеф. Озеро Чудесная ламба отличается малыми размерами и ровным характером дна, малой площадью водосбора и атмосферным питанием. Влияние водосборной территории на процесс формирования донных отложений минимально. Осадочный процесс в озере контролируется биотой, причем не только водной, но и болотной. Водоем является зарастающим (сплавина присутствует по всей береговой линии), окружен болотом, которое в два раза превышает площадь озера.

Материалы и методы

Донные отложения озера Чудесная ламба были вскрыты в апреле 2024 г. (скважина 24-01, два керна донных отложений, общая мощность 1,2 м). Отбор длинных кернов донных отложений осуществлялся торфяным буром (длина пробоотборной части 1 м, ширина 5 см) со льда и выполнялся с наложением для последующей их корреляции и отсутствия промежутков при составлении отдельных кернов в единый разрез отложений. В полевых условиях проведено первичное литологическое описание, включающее цвет осадка, границы смены литологического характера отложений, описание имеющихся минеральных или органических вкраплений. Керны были упакованы для доставки в институт и разобраны на образцы в лабораторных условиях. На каждый вид анализа отбиралось по шесть образцов с глубин 7,50–7,10 м с интервалом 4 см.

Подготовка проб для проведения гранулометрического анализа состояла в удалении крупных органических включений, перемешивании образца в воде в магнитной мешалке в течение 7 минут, затем образец помещался в ультразвуковую ванну мощностью 60 Вт на 2 минуты. Гранулометрический состав донных отложений изучен с помощью лазерного анализатора частиц LS 13 320 (Beckman Coulter, США). Для численной оценки статистик эмпирических распределений частиц по размерам использовался метод квартилей [Trask, 1932]. Фракции отложений описаны по классификации механических элементов [Качинский, 1958], диаметр частиц указан в микрометрах.

Для исследуемого керна донных отложений проведены следующие анализы: потери массы при прокаливании (ППП), зольность осадка, $N_{орг}$ [Аринушкина, 1982], содержание $C_{орг}$ [ПНД Ф 14.1:2:3:4.279-14; ГОСТ Р 52991-2008] (анализатор Shimadzu TOC-LCSN, Япония) и $P_{общ}$ [РД 52.24.382-2019].

Результаты

Литологическое описание исследуемого разреза донных отложений озера Чудесная ламба приведено на рис. 3.

Дно озера покрыто мощным покровом водного мха (*Warnstorfia fluitans*), высота которого достигает 3 и более метров. В данном исследовании авторы сосредоточили внимание на особенностях накопления органического вещества, поэтому было принято решение детально изучить центральный участок разреза с переслаиванием гиттии с торфом и бурым алевритом в нижней части (глубины 7,50–7,10 м). Выше этого участка расположена подушка из частично разложившегося мха, а ниже – слой плотного серого алеврита (рис. 3).

Литологическое описание исследуемого участка разреза (7,50–7,10 м) и визуализация результатов гранулометрического и химических анализов представлены на рис. 4. В ходе обобщения полученных данных выделены три горизонта, которые свидетельствуют о разных седиментационных обстановках в озере Чудесная ламба.

Горизонт I (7,50–7,33 м). Осадок представлен серым алевритом. Значения ППП наименьшие в нижней части разреза, увеличиваются

от 0 до 50 %, тренд на повышение значения сопоставим с плавным переходом цвета алеврита от серого к бурому. Только в этом горизонте присутствуют наиболее тонкие фракции до 1 мкм (коллоиды и илы), их доля изменяется от 7 до 0,5 %. Выше по разрезу происходит увеличение фракции мелкого песка (50–250 мкм), его доля изменяется от 0 до 52 %. Зольность достигает наибольших значений в керне в нижней части (93 %), далее плавно уменьшается до 83 %. Рассматриваемый состав органических веществ ($C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{общ}$) в этом горизонте также имеет наименьшие значения в нижней части разреза, но при уменьшении глубины происходит плавное увеличение значений: $C_{орг}$ – 1–10 %, $N_{орг}$ – 0,08–1,9 % и $P_{общ}$ – 0,102–0,11 %. Стоит отметить, что $P_{общ}$ в целом слабо выражен в отложениях озера Чудесная ламба (диапазон от 0 до 0,15 %).

Отложения горизонта II (7,33–7,26 м) представлены в верхней части светло-коричневой гиттией и ниже двумя слоями бурого и желто-коричневого торфа. Результаты анализов подтверждают нестабильное состояние водоема во время образования этой части разреза, наблюдается довольно резкое колебание во всех исследуемых показателях. Происходит быстрое

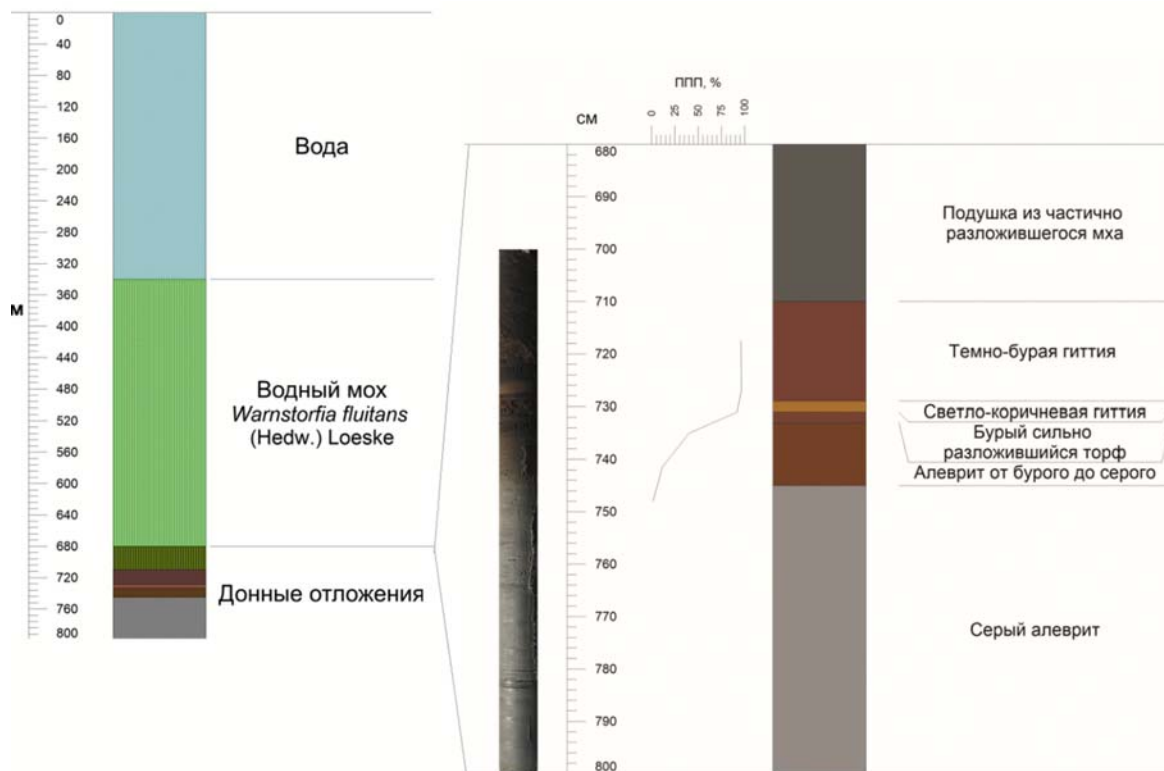


Рис. 3. Разрез донных отложений озера Чудесная ламба, керн ст. 24-01

Fig. 3. Bottom sediments section of Lake Chudesnaya Lamba, core of st. 24-01

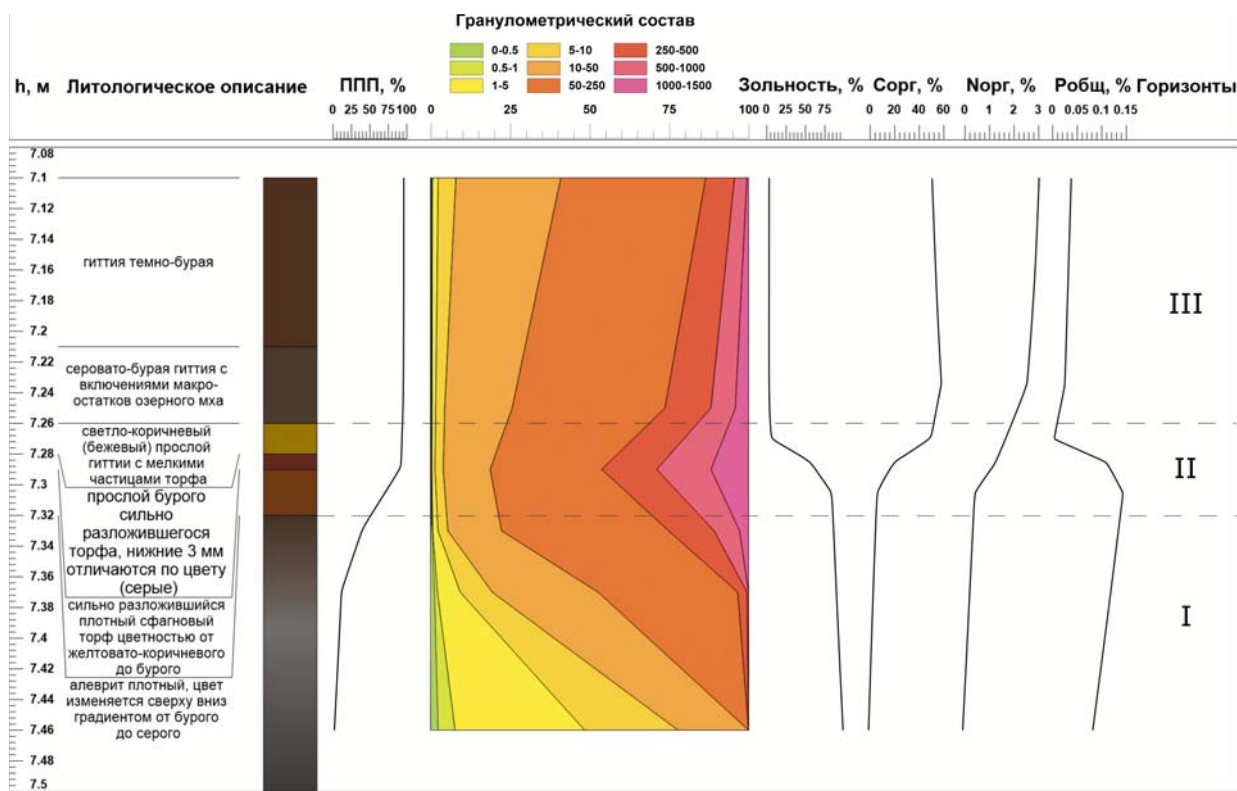


Рис. 4. Общая схема изучения разреза донных отложений озера Чудесная ламба

Fig. 4. General scheme of studying the section of bottom sediments of Lake Chudesnaya Lamba

увеличение ППП (50–96 %). По результатам гранулометрического анализа в горизонте преобладают наиболее крупные в этом разрезе фракции среднего (250–500 мкм) и крупного (500–1000 мкм) песка, а также грубообломочных частиц (1000–1500 мкм). Графики значений зольности, $S_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{общ}$ на этом участке также достаточно резко изменяются. Выше по разрезу зольность и $P_{общ}$ неуклонно падают (83–2 и 0,11–0,025 % соответственно), а $S_{орг}$ и $N_{орг}$ возрастают (соответственно 10–57 и 1,9–2,5 %).

Верхняя часть разреза, горизонт III (7,26–7,10 м), сложена серовато-бурой и темно-бурой гиттией. В данной части разреза ППП стабильно высокий (95 %), по гранулометрическому составу преобладают крупная пыль (10–50 мкм) и мелкий песок (50–250 мкм), суммарно их доля в горизонте составляет около 78 %. Зольность неизменно мала (3 %), при уменьшении глубины $S_{орг}$ уменьшается (с 57 до 47 %), $N_{орг}$ незначительно увеличивается (с 2,5 до 2,9 %), $P_{общ}$ также незначительно увеличивается (с 0,025 до 0,043 %).

По коэффициентам сортировки (S_o) и асимметрии (S_k) все пробы донных отложений озера Чудесная ламба относятся к плохо сортированным осадкам, в основном преобладает мелкий песок (50–250 мкм).

Обсуждение

Озеро Чудесная ламба расположено между крупной флювиогляциальной системой на западе и обширной озерно-ледниковой равниной на востоке. Флювиогляциальная система представляет собой серию озовых гряд, образованных проекцией песчано-гравийно-галечных отложений внутрiledниковых потоков на ложе ледника. Она начала формироваться в аллереде (ок. 13,5 тыс. кал. л. н.) [Демидов и др., 2006] при отступлении края ледника с территории Южной Карелии. Озерно-ледниковая равнина образовалась при дальнейшем таянии льда, которое привело к возникновению Онежского приледникового озера (ок. 120–125 м над ур. м.) [Демидов, 2006; Zobkov et al., 2019]. В водоеме накапливались ледниково-озерные отложения, в том числе в глубоководных условиях сезонно слоистые ленточные глины. Наибольшей мощности и распространения эти отложения достигают в депрессиях ложа вдоль флювиогляциальных систем, по которым шло основное поступление талых вод и песчано-глинистых наносов в приледниковое озеро [Демидов и др., 2006]. Однако в полученном разрезе донных отложений

мы не наблюдаем ленточных глин, вероятно, они залегают на большей глубине, добраться до которой при помощи ручного бура в данной точке котловины озера не представилось возможным.

Около 13,2 тыс. кал. л. н., предположительно во время потепления аллереда, после освобождения от материкового льда Онежско-Беломорского, а затем Онежско-Ладожского перешейков, произошло резкое падение уровня приледникового водоема (более чем на 25 м) и осаждение в условиях мелководий алевритов [Демидов, 2006; Zobkov et al., 2019]. В разрезе донных отложений озера Чудесная ламба нижний слой представлен серыми алевритами, формирование которых можно отнести к этому периоду истории Онежского приледникового озера (слой серого алеврита 8,00–7,50 м, нижняя часть полного разреза).

Дальнейшее понижение уровня Онежского озера, связанное в том числе с открытием стока по р. Свирь (ок. 12,3 тыс. кал. л. н.) [Демидов, 2006; Zobkov et al., 2019], способствовало образованию обширных мелководных заливов. В них началось накопление отложений с повышенным содержанием органического вещества. Этот период в разрезе донных отложений озера Чудесная ламба маркируется слоем алевритов от серого до бурого (горизонт I, 7,50–7,33 м), где ППП увеличиваются от 1 до 50 %. Следует отметить, что накопление органических отложений в ближайших изученных озерах началось в этот же период – около 12,2–12,0 тыс. кал. л. н., например, в озерах Шавнилампи – $10\,490 \pm 110$ ^{14}C л. н. (ЛЕ 6988) и Большое Хаугилампи – $10\,060 \pm 130$ ^{14}C л. н. (ЛЕ 6986) [Шелехова и др., 2005].

В ходе дальнейшего понижения уровня происходило обмеление заливов и их заболачивание. В донных отложениях изучаемого водоема выделяется слой бурого сильно разложившегося торфа (горизонт II, 7,33–7,26 м).

Полное обособление водоема произошло ориентировочно после окончания ледниковой эпохи, в пребореале – бореале (ок. 11–10 тыс. кал. л. н.), в том числе за счет просадки его днища в результате таяния погребенного льда. В это время отмечается быстрый рост температуры в Северном полушарии с некоторыми периодами похолоданий. Повышение уровня воды способствовало интенсивному накоплению темно-бурых органических отложений (горизонт III, 7,26–7,00 м).

Процесс заболачивания и зарастания озера Чудесная ламба сплавиной, который продолжается и в настоящее время, начался, вероятно, в атлантике (ок. 9 кал. тыс. л. н.),

этот период отмечается как наиболее влажный и теплый в Северной Европе в голоцене.

Выделенные на основе изучения стратиграфии донных отложений периоды истории водоема с разными условиями формирования отложений подтверждаются результатами гранулометрического и химических анализов.

Заключение

В ландшафтной структуре водосбора озера Чудесная ламба преобладают местоположения дренированных равнин на безвалунных песках и озовых грядах с сосновыми кустарничково-лишайниковыми лесами на подзолах, а также олиготрофных торфяников с пушицево-болотнокустарничково-сфагновыми болотами с редкостойной сосной и безлесными на верховых болотных почвах. Следов современного антропогенного воздействия на ландшафты не выявлено.

На основе литостратиграфического описания, гранулометрического и химического анализов донных отложений озера выделены три горизонта, свидетельствующие о разных седиментационных обстановках, реконструирована история осадочного процесса в озере.

Донные отложения, накопленные в период существования Онежского приледникового озера (горизонт I, 7,50–7,33 м), закономерно имеют минеральный характер: зольность 94 %, $C_{\text{орг}}$ 1–10 %, ППП 1,4 %. Осадки, формировавшиеся в период климатических изменений, после того как водоем потерял контакт с краем ледника (горизонт II, 7,33–7,26 м), отличаются значительным градиентом концентраций органического вещества (изменение ППП от 1,4 до 92 %, $C_{\text{орг}}$ – от 10 до 50 %). В голоцене (горизонт III, 7,26–7,10 м) водоем становится накопителем органического вещества: содержание $C_{\text{орг}}$ колеблется в пределах 47–58 %, ППП – 92–96 %.

Озеро Чудесная ламба в условиях гумидного климата как элемент ландшафта выполняет функцию накопителя органического вещества. Скорость накопления углерода низкая – около 1 кг $C_{\text{орг}}$ на 1 м² дна за 100 лет [Лукина и др., 2024].

Полученная информация о содержании и особенностях накопления органического вещества в донных отложениях озера Чудесная ламба вместе с использованием балансовой модели потоков органического вещества в трофических сетях позволят рассчитать баланс углерода в экосистеме модельного водоема и разработать прогнозные оценки потоков CO_2 с поверхности воды в зависимости от химического состава воды и географического положения водоема.

Легенда карты ландшафтной структуры района исследований
Legend of the landscape structure map of the study area

№ No.	Виды местоположений и преобладающих состояний растительности и почв Landscape sites and dominant long-term states of vegetation and soil types	Площадь Area		
		км ² km ²	га ha	%
1	Невысокие пологосклонные супесчано-валунные (моренные) холмы и гряды, сложенные несортированными песками с плохо окатанными валунами, в сочетании с участками пологонаклонных равнин на безвалунных песках и валунных супесях, дренированные. Растительность: сосновые, елово-сосновые с примесью березы чернично-зеленомошные и кустарничково-вейниково-зеленомошные леса. Почвы: подбуры грубогумусные иллювиально-железистые супесчаные среднещебнистые Low gently sloping sandy loamy boulder (moraine) hills and ridges composed of unsorted sands with weakly rolled boulders, combined with areas of flat plains on boulder-free sands and boulder loams, drained. Vegetation: pine, spruce-pine with admixture of birch, bilberry-green-moss and shrub-brambrerry-green-moss forests. Soils: podburs coarse-humus illuvial-iron loamy medium loamy	0,085	8,5	7
2	Округлые холмы и группы холмов с крутыми склонами и склонами средней крутизны (5–25°); сложены валунами, с поверхности безвалунными, галечными и мелковалунными песками и супесями (озы); хорошо дренированные, с минеральными почвами; нередко в сочетании с термокарстовыми впадинами. Растительность: сосновые, елово-сосновые лишайниковые, чернично-зеленомошные и кустарничково-зеленомошно-лишайниковые леса. Почвы: подзолы иллювиально-гумусовые; подбуры оподзоленные иллювиально-гумусовые Rounded hills and groups of hills with steep slopes and slopes of medium steepness (5-25°); composed of boulders, boulderless, pebble and fine-boulder sands and sandy loam from the surface; well-drained, with mineral soils; often combined with thermokarst hollows. Vegetation: pine, spruce-pine lichen forests, bilberry-green-moss and shrub-green-moss-lichen forests. Soils: illuvial-humus podzols; illuvial-humus podburs	0,240	24,0	19
3	Дренированные волнистые и слабоволнистые равнины, сложенные мелковалунно-галечными (флювиогляциальными) песками, с щебнем сильной окатанности. Растительность: сосновые, елово-сосновые лишайниковые, чернично-зеленомошные и кустарничково-зеленомошно-лишайниковые леса. Почвы: подбуры, в том числе оподзоленные иллювиально-гумусовые Drained undulating and slightly undulating plains composed of small boulder-pebble (fluvioglacial) sands with gravel. Vegetation: pine, spruce-pine lichen forests, bilberry-green-moss and shrub-green-moss-lichen forests. Soils: podzols, including podzolic illuvial-humus soils	0,064	6,4	5
4	Дренированные волнистые равнины на безвалунных (озерно-ледниковых, озерных) песках; с минеральными почвами. Растительность: сосновые, сосновые с примесью ели лишайниковые, чернично-зеленомошные и кустарничково-зеленомошно-лишайниковые леса. Почвы: подзолы, в том числе оподзоленные иллювиально-гумусовые Drained undulating plains on lake-glacial, lake sands; with mineral soils Vegetation: pine, pine with admixture of spruce lichen, bilberry-green-moss and shrub-green-moss-lichen forests. Soils: podzols, including podzolic illuvial-humus soils	0,380	38,0	30
5	Слабоволнистые пологонаклонные (до 5°) равнины на безвалунных глинах и суглинках. Растительность: елово-сосновые с примесью березы, осиново-елово-сосновые, осиново-еловые чернично-зеленомошные, вейниково-кустарничково-зеленомошные и травяно-чернично-зеленомошные леса. Почвы: дерново-глеевые Slightly undulating gently sloping (up to 5°) plains on clays and loams. Vegetation: spruce-pine with birch, aspen-spruce-pine, aspen-spruce-pine, aspen-spruce-blackberry-green-moss, reed-bush-green-moss and grass-blackberry-green-moss forests. Soils: soddy-gley	0,128	12,8	10

№ No.	Виды местоположений и преобладающих состояний растительности и почв Landscape sites and dominant long-term states of vegetation and soil types	Площадь Area		
		км ² km ²	га ha	%
6	Плоские и пологонаклонные равнины на безвалунных глинах и суглинках, длительно естественно переувлажненные, с органоминеральными почвами (торфянистый горизонт мощностью до 0,5 м). Растительность: елово-березовые травяно-осоково-папоротниковые леса и осоково-тростниковые с порослью березы растительные сообщества. Почвы: торфяно-глеевые, торфянисто-глеевые Flat and gently sloping plains on clays and loams, naturally overmoistened for a long time, with organomineral soils (peat horizon up to 0.5 m thick). Vegetation: spruce-birch grass-sedge-sedge-fern forests and sedge-reed with birch overgrowth. Soils: peaty-gleyey, peaty-gleyey soils	0,194	19,4	15
7	Олиготрофные (верховые) торфяники с гомогенной структурой и мелкобугристым микро-рельефом; с постоянным естественным избыточным увлажнением; органогенные почвы (мощность торфа более 0,5 м). Растительность: сосновые кустарничково-сфагновые леса, пушицево-кустарничково-сфагновые верховые болота с сосной и безлесные. Почвы: торфяные болотные Oligotrophic peat with homogeneous structure and shallow bumpy microrelief; with permanent natural excessive moisture; organogenic soils (peat thickness more than 0.5 m). Vegetation: pine-sphagnum forests, shrub-sphagnum bogs with pine and non-forested. Soils: peat bog soils	0,100	11,6	9
8	Олиготрофные (верховые) торфяники с грядово-мочажинными и грядово-озерковыми комплексами с постоянным естественным избыточным увлажнением, органогенные почвы (мощность торфа более 2 м). Растительность: по грядам и кочкам – кустарничково-сфагновые угнетенные сосняки; в мочажинах – очеретниково-сфагновые топи, разреженный сфагновый покров, вода. Почвы: торфяные болотные Oligotrophic peatlands with ridge and ridge and lake complexes with permanent natural excessive moisture, organogenic soils (peat thickness more than 2 m). Vegetation: on ridges and bumps – shrubby sphagnum depressed pine forests; sphagnum swamps, sparse sphagnum cover. Soils: peaty bog soils	0,018	1,8	1
9	Поймы и надпойменные террасы рек, с периодическим избыточным увлажнением. Растительность: заросли тростника, мелколиственно-высокотравные растительные ассоциации. Почвы: глеевые, торфяно-глеевые Floodplains and floodplain terraces of rivers, with periodic excessive moistening. Vegetation: reed thickets, small-leaved-high herbaceous plant associations. Soils: gley soils, peat-gley soils	0,052	5,2	4
Всего (без учета площади водных объектов) Total (excluding the area of water bodies)		1,261	127,7	100

Литература

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1982. 487 с.

Белкина Н. А. Закономерности осадконакопления и раннего диагенеза донных отложений в водоемах юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. СПб., 2021. 48 с.

Белкина Н. А. Поверхностные донные отложения карельских озер, особенности формирования и химический состав // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 3. С. 120–129. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-111

ГОСТ Р 52991-2008. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. М.: Стандартинформ, 2009. 17 с.

Демидов И. Н., Лукашов А. Д., Ильин В. А. Рельеф заповедника «Кивач» и история геологического развития северо-западного Прионежья в четвертичном периоде // Природа государственного заповедника «Кивач». Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 10. С. 22–33.

Демидов И. Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменении его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9.

Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. С. 171–182.

Исаченко Г. А. Методы полевых ландшафтных исследований и ландшафтно-экологическое картографирование. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1998. 112 с.

Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 191 с.

Кутенков С. А. Тайны глубин Чудесной ламбы // Заповедник Кивач – 90 лет на страже природы: история, достижения и перспективы. Петрозаводск: Версо, 2021. С. 17–21.

Лукина Ю. Н., Белкина Н. А., Калинкина Н. М., Богданов С. Р., Зобков М. Б., Здорovenнов Р. Э., Потахин М. С., Здорovenнова 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

ПНД Ф 14.1:2:3:4.279-14. Методика измерений массовых концентраций органического углерода и общего азота в питьевых, природных и сточных водах методом высокотемпературного окисления с использованием анализаторов углерода и азота. М., 2014. 19 с.

РД 52.24.382-2019. Массовая концентрация фосфатного фосфора в водах. Методика измерений фотометрическим методом: разработана ФГБУ ГХИ: принята ФГБУ НПО Тайфун. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2019. 31 с.

Шелехова Т. С., Лазарева О. В., Демидов И. Н. Палеоэкологические условия развития Северо-Западного Прионежья в позднеледниковье и голоцене // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. С. 149–157.

Biskaborn B. K., Subetto D. A., Savelieva L. A., Vakhrameeva P. S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinecke L., Pestryakova L. A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability // Quat. Sci. Rev. 2016. Vol. 147. P. 406–421. doi: 10.1016/j.quascirev.2015.08.014

Pfaff G., Diekmann B., Freytag J., Biskaborn B. Effect of temperature on carbon accumulation in northern lake systems over the past 21,000 years // Front. Earth Sci. 2023. Vol. 11. Art. 1233713. doi: 10.3389/feart.2023.1233713

Trask P. D. Origin and environment of source sediments of petroleum. Houston: Gulf. Publ. Co, 1932. 281 p.

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D., Tarasov A. Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations // J. Paleolimnol. 2019. Vol. 62, no. 1. P. 53–71. doi: 10.1007/s10933-019-00075-3

References

Arinushkina E. V. Manual on chemical analysis of soils. Moscow: MSU; 1982. 487. p. (In Russ.)

Belkina N. A. Regularities of sedimentation and early diagenesis of bottom sediments in water bodies of the southeastern part of the Fennoscandian crystalline shield: Summary of PhD (Dr. of Geog.) thesis. St. Petersburg; 2021. 48 p. (In Russ.)

Belkina N. A. Surface sediments of Karelian lakes: their formation peculiarities and chemical composition. *Limnology and Freshwater Biology*. 2024;3:111–119. doi: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-111

Biskaborn B. K., Subetto D. A., Savelieva L. A., Vakhrameeva P. S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinecke L., Pestryakova L. A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability. *Quat. Sci. Rev.* 2016;147:406–421. doi: 10.1016/j.quascirev.2015.08.014

GOST R 52991-2008. Water. Methods for determining the content of total and dissolved organic carbon. Moscow: Standartinform; 2009. 17 p. (In Russ.)

Demidov I. N., Lukashov A. D., Il'in V. A. Relief of the Kivach Nature Reserve and the history of geological development of the northwestern Priozhnyye in the Quaternary period. *Priroda gosudarstvennogo zapovednika «Kivach»*. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Nature of the Kivach Nature Reserve. Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2006;10: 22–33. (In Russ.)

Demidov I. N. On the maximum stage of the Onega glacial lake development, its level change and glacioisostatic uplift of the coasts in the Late Glacial. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Mineral Resources of Karelia*. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. P. 171–182. (In Russ.)

Isachenko G. A. The methods of field study of landscape and the landscape-ecological mapping. St. Petersburg: St. Peterb. univers.; 1998. 112 p. (In Russ.)

Kachinskii N. A. Mechanical and microaggregate composition of soil, methods of its study. Moscow: AN SSSR; 1958. 191 p. (In Russ.)

Kutenkov S. A. Secrets of the depths of Lake Chudskaya Lamba. *Zapovednik Kivach – 90 let na strazhe prirody: istoriya, dostizheniya i perspektivy = Kivach Nature Reserve – 90 years on guard of nature: history, achievements, and prospects*. Petrozavodsk: Verso; 2021. P. 17–21. (In Russ.)

Lukina Y. 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., Pal'shin N. I., Bородулина G. S., Богданова M. S., Мясникова N. A., Смирнов S. I., Новикова Y. S., Гатальская E. V., Морозова I. V., Зобкова M. V., Сластина Y. L., Макарова E. M., Сярки M. T., Коновалов D. S., Теканова 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;5:97–114. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1954

Pfalz G., Diekmann B., Freytag J., Biskaborn B. Effect of temperature on carbon accumulation in northern lake systems over the past 21,000 years. *Front. Earth Sci.* 2023;11:1233713. doi: 10.3389/feart.2023.1233713

PND F 14.1:2:3:4.279-14. Methodology for measuring mass concentrations of organic carbon and total nitrogen in drinking, natural and waste waters by high-temperature oxidation method using carbon and nitrogen analyzers. Moscow; 2014. 19 p. (In Russ.)

RD 52.24.382-2019. Mass concentration of phosphate phosphorus in waters. Methods of measurements by photometric method: developed by FBSI Hydrochemical Institute; adopted by FBSI SPA Typhoon. Rostov-on-Don: Roshydromet; 2019. 31 p. (In Russ.)

Shelekhova T. S., Lazareva O. V., Demidov I. N. Paleocological conditions of development of the Northwestern Prionezhye in the Late Glacial and Holocene. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Mineral Resources of Karelia*. Iss. 8. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2005. P. 149–157. (In Russ.)

Trask P. D. Origin and environment of source sediments of petroleum. Houston: Gulf. Publ. Co; 1932. 281 p.

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D., Tarasov A. Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations. *J. Paleolimnol.* 2019;62(1):53–71. doi: 10.1007/s10933-019-00075-3

Поступила в редакцию / received: 15.12.2024; принята к публикации / accepted: 06.03.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Потакхин Максим Сергеевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: mpotakhin@mail.ru

Белкина Наталья Александровна

д-р геогр. наук, руководитель группы исследований донных отложений, ведущий научный сотрудник

e-mail: bel110863@mail.ru

Богданова Мария Сергеевна

младший научный сотрудник

e-mail: mari-mb@mail.ru

Мясникова Надежда Александровна

канд. геогр. наук, младший научный сотрудник

e-mail: nadezda_myasnikova@mail.ru

Морозова Ирина Валерьевна

младший научный сотрудник

e-mail: ivm1502@yandex.ru

Гатальская Екатерина Владимировна

младший научный сотрудник

e-mail: katusha9210@yandex.ru

Орлов Александр Владимирович

младший научный сотрудник ИВПС КарНЦ РАН; младший научный сотрудник НИЛ «Рационального природопользования» РГПУ им. А. И. Герцена

e-mail: 95orlov@rambler.ru

Пронина Анастасия Викторовна

аспирант, стажер-исследователь

e-mail: anastasiya.2802@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Potakhin, Maksim

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Belkina, Natalya

Dr. Sci. (Geog.), Head of Sediment Research Group, Leading Researcher

Bogdanova, Maria

Junior Researcher

Myasnikova, Nadezhda

Cand. Sci. (Geog.), Junior Researcher

Morozova, Irina

Junior Researcher

Gatalskaya, Ekaterina

Junior Researcher

Orlov, Alexander

Junior Researcher, NWPI KarRC RAS; Junior Researcher, Research Laboratory for Sane Nature Management, Herzen University

Pronina, Anastasia

Doctoral Student, Intern Researcher