

УДК 502.51/52:546.26 (985)

ББК 26.23 (231)

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-69-89>



## Содержание и запасы углерода в компонентах наземных и водных экосистем Мурманской области в зоне воздействия АО «Кольская ГМК»

Сухарева Т.А.<sup>1</sup>✉, Денисов Д.Б.<sup>1</sup>, Живов Д.А.<sup>1</sup>,  
Слуковский З.И.<sup>1</sup>, Курбатов Е.А.<sup>2</sup>, Фадеев А.М.<sup>2</sup>,  
Бортник А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера ФГБУН ФИЦ  
«Кольский научный центр» РАН, Апатиты, Мурманская область,  
Россия

<sup>2</sup>АО «Кольская горно-металлургическая компания», Мончегорск,  
Мурманская область, Россия

✉ [t.sukhareva@ksc.ru](mailto:t.sukhareva@ksc.ru)

**Аннотация.** В Мурманской области учеными Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН) совместно с АО «Кольская ГМК» впервые начаты комплексные исследования наземных и водных экосистем с целью оценки их способности к депонированию углерода в зоне расположения металлургического производства (площадка Мончегорск). В 2024–2025 гг. в ходе экспедиционных исследований получены новые данные по составу почвы, воды и донных отложений на фоновых и нарушенных территориях. Анализ собранного полевого научного материала с привлечением данных многолетних мониторинговых наблюдений показал, что в настоящее время существует недооценка углерододепонирующей способности экосистем Севера, в том числе в условиях промышленного воздействия. Получены объективные оценки по депонированию углерода различными компонентами экосистемам (лесных, водных, болотных). Результаты работы будут способствовать совершенствованию национальной системы мониторинга климатически активных веществ и планированию компенсационных мероприятий, направленных на сокращение содержания парниковых газов в атмосфере. Дальнейшие исследования позволят оценить потенциал северных экосистем по депонированию углерода, разработать научно-методические рекомендации по адаптации экосистем к климатическим изменениям и достижению углеродной нейтральности в регионе, в том числе при реализации природно-климатических проектов.

**Ключевые слова:** углерод, почва, торф, озера, донные отложения, техногенное воздействие, Российская Арктика

**Конфликт интересов:** авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Сухарева Т.А., Денисов Д.Б., Живов Д.А., Слуковский З.И., Курбатов Е.А., Фадеев А.М., Бортник Е.А. Содержание и запасы углерода в компонентах наземных и водных экосистем Мурманской области в зоне воздействия АО «Кольская ГМК». *Арктика и инновации*. 2026;4(2):69–89. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-69-89>

# Carbon content and carbon stocks in terrestrial and aquatic ecosystem components of Murmansk Region, Russia, in the impact zone of JSC “Kola MMC”

Tatyana A. Sukhareva<sup>✉</sup>, Dmitrii B. Denisov<sup>1</sup>,  
Dmitry A. Zhivov<sup>1</sup>, Zakhar I. Slukovskii<sup>1</sup>,  
Evgeny A. Kurbatov<sup>2</sup>, Anton M. Fadeev<sup>2</sup>,  
Anzhelika S. Bortnik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk region, Russia

<sup>2</sup> JSC “Kola Mining and Metallurgical Company”, Monchegorsk, Murmansk region, Russia

✉ [t.sukhareva@ksc.ru](mailto:t.sukhareva@ksc.ru)

**Abstract.** In Murmansk Region, Russia, researchers from the Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (INEP KSC RAS), together with JSC “Kola MMC”, conducted the first integrated assessment of terrestrial and aquatic ecosystems to evaluate their carbon sequestration capacity in the vicinity of metallurgical operations at the Monchegorsk site. During field campaigns in 2024–2025, new data were obtained on the composition of soils, waters, and bottom sediments in background areas and in areas affected by industrial activity. Analysis of these field data, combined with long-term monitoring records, indicates that the carbon sequestration potential of northern ecosystems, including those exposed to industrial emissions, has been systematically underestimated. Actual estimates were generated for carbon storage across major ecosystem components, including forest, freshwater, and peatland systems. The results will support improvements to the national monitoring system for climate-active substances and inform the planning of compensatory measures aimed at reducing atmospheric greenhouse gas concentrations. Continued research will enable more accurate assessments of the carbon sequestration potential of northern ecosystems and provide scientific and methodological guidance for ecosystem adaptation to climate change and for achieving regional carbon neutrality, including through nature-based climate projects.

**Keywords:** carbon, soil, peat, lakes, bottom sediments, anthropogenic impact, Russian Arctic

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Sukhareva T.A., Denisov D.B., Zhivov D.A., Slukovskii Z.I., Kurbatov E.A., Fadeev A.M., Bortnik E.A. Carbon content and carbon stocks in terrestrial and aquatic ecosystem components of Murmansk Region, Russia, in the impact zone of JSC “Kola MMC”. *Arctic and Innovation*. 2026;4(2): 69–89. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-69-89>

## Введение

Мурманская область — один из наиболее промышленно развитых регионов Арктики, на территории которого функционируют крупные предприятия горнопромышленного и металлургического комплексов. Наземные и водные экосистемы Мурманской области испытывают экстремальное

воздействие природных и антропогенных факторов, сложное сочетание которых определяет особенности биогеохимических циклов и деструкции органического вещества.

Значительный вклад в поглощение углерода вносят леса [1]. Треть углеродного стока наземных экосистем приходится на леса

бореальной зоны [2]. Около 2/3 всех мировых бореальных лесов находятся на территории России, что свидетельствует о глобальном значении лесов страны в контексте депонирования атмосферного углерода. По современным оценкам [3], Российская Федерация является крупнейшей страной-поглотителем углерода. Количественные оценки вклада лесных экосистем страны в углеродный баланс и, следовательно, в регуляцию климата планеты являются важным и актуальным вопросом, что подтверждается международным Парижским соглашением [4].

Большая часть углерода в лесах мира содержится в фитомассе и почвах [1]. По некоторым оценкам, доля почвенного углерода в бореальных лесах может быть весьма значительной и составлять 40 % и более от общих запасов углерода в лесных экосистемах [5]. Бореальные леса содержат около 15 % мировых запасов почвенного углерода и вносят весомый вклад в глобальный цикл углерода [6–9], являясь значительным резервуаром органического вещества. Потепление климата может привести к интенсификации процессов разложения органических остатков в лесах и к увеличению поступления  $\text{CO}_2$  из почвы в атмосферу. В последние годы исследования по оценке пулов и потоков углерода в наземных экосистемах, в том числе в почвах, активизировались в разных странах и регионах [10–16]. Однако анализ литературных данных свидетельствует о недостатке актуальных сведений о пространственном распределении почвенных пулов углерода в бореальных лесах, в том числе в Мурманской области.

Аналогичный интерес вызывают пресноводные и болотные экосистемы, которые также выступают как резервуары накопления органического углерода, запасы которого в зависимости от географического положения варьируют в широких пределах [17–21]. Органический углерод выступает одним из индикативных показателей, отражающих скорость продукции и деструкции, климатические и техногенные воздействия, качество вод и эффективность процессов самоочищения водоемов. Содержание органического углерода в незагрязненных поверхностных водах, как правило, находится в диапазоне от 1 до 10 мг/дм<sup>3</sup>, в загрязненных — превышает 10 мг/дм<sup>3</sup>, а в сильно загрязненных — превышает 100 мг/дм<sup>3</sup> [22]; для питьевой воды установлено нормативное значение

содержания общего органического углерода, равное 5 мг/дм<sup>3</sup> [23]. К настоящему времени практически отсутствует информация о содержании и запасах углерода водными и болотными экосистемами Мурманской области.

Пресноводные и болотные экосистемы являются важными элементами ландшафтной структуры Арктики, обеспечивая транспорт, трансформацию и депонирование углерода. Однако степень их участия в региональном и глобальном углеродном балансе в зоне воздействия металлургической промышленности остается недостаточно изученной, особенно для территории Мурманской области, где наблюдается дефицит комплексных полевых и долговременных наблюдений.

Актуальность исследований различных экосистем обусловлена усиливающимися процессами климатического потепления: повышение температуры воздуха наряду с изменениями гидрологического режима приводят к активизации разложения органического вещества и высвобождению углерода в атмосферу. Это может усиливать парниковый эффект и формировать положительную обратную связь в системе «климат — экосистемы».

Научно-исследовательская работа направлена на решение экологической проблемы оценки способности наземных и водных экосистем Мурманской области к депонированию углерода. Значимость результатов работы обусловлена необходимостью получения объективных данных о запасах углерода в экосистемах, совершенствования методологии их оценки и устойчивого управления экосистемами Арктики, в том числе в зоне расположения промышленных предприятий. Полученная информация является частью общих объективных данных о пулах углерода в экосистемах России и позволяет разрабатывать научную основу и методические рекомендации по мониторингу углерода и парниковых газов, а также по адаптации экосистем к климатическим изменениям и достижению углеродной нейтральности в регионе.

Цель данного исследования — оценка содержания и запасов углерода в почве, воде и озерных донных отложениях в экосистемах Мурманской области в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск).

## Объекты и методы исследования

Проведение исследований по содержанию и запасам углерода в наземных и водных экосистемах требует применения единых методических подходов для получения корректных сравнительных данных в различных регионах и природно-климатических зонах. Методической основой данной работы являются рекомендации, разработанные в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) в 2022–2024 гг. «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах».

При проведении работ руководствовались следующими методиками.

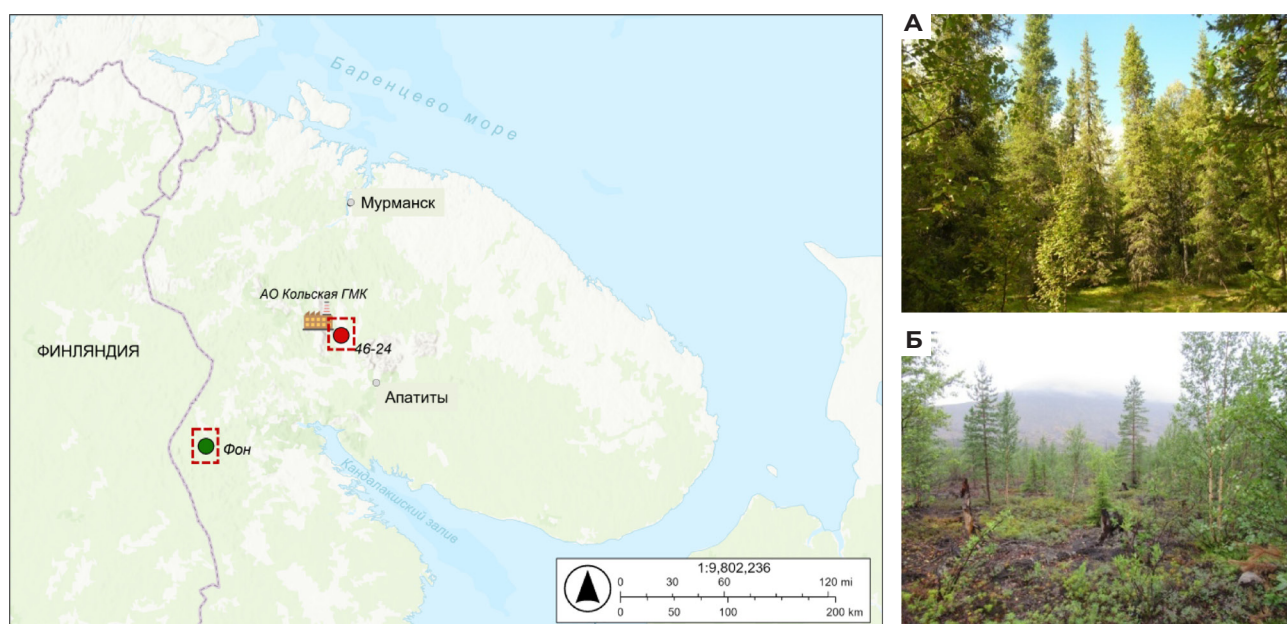
1. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в лесных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов [24].

2. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в болотных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов [25].

3. Методические рекомендации по проведению химического анализа природных вод [26].

4. Методические рекомендации по пробоподготовке и проведению физико-химического анализа почвенных и растительных образцов [27].

**Наземные экосистемы.** Полевые исследования были проведены в 2024–2025 гг. в конце вегетации (август–сентябрь). Объектами исследования послужили доминирующие в бореальной зоне хвойные леса на ненарушенных (фоновых) территориях и на пробной площадке (ПП) № 46-24 в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) (рис. 1, табл. 1). Фоновая ПП отражает региональный фон района исследований и соответствует всем критериям для контрольных площадок, которые рекомендуются международной программой ICP Forests [29].



**Рис. 1.** Карта-схема расположения пробных площадей наземных экосистем в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) и на фоновых территориях. Примечание: А — фон, Б — техногенное редколесье (пробная площадка № 46-24)

**Fig. 1.** Sampling plots of the terrestrial ecosystem in the impact zone of JSC Kola MMC (Monchegorsk site) and in background areas. Note: A — background area, B — open woodland affected by industrial activity (plot No. 46-24)

**Таблица 1.** Объекты исследования наземных экосистем

**Table 1.** Sampling sites of terrestrial ecosystems

Объект исследования The object of research	Размер, га Size, ha	Расстояние (км), направление от АО «Кольская ГМК» Distance (km), direction from JSC «Kola MMC»	Растительное сообщество The plant community
Фон	0,25	167, ЮЗ	Ельник кустарничково-зеленомошный
Техногенное редколесье (ПП № 46-24)	0,25	3, ЮВ	Редкостойный сосняк с березами кустарничковый моховой на месте сосново-березово-елового леса

Почвенные исследования на пробной площади № 46-24 выполнены в рамках выполнения Договора АО «Кольская ГМК»; на фоновой ПП — в рамках выполнения темы Госзадания ИППЭС КНЦ РАН и Проекта ВИП ГЗ.

В ходе полевых исследований для определения запаса подстилки отбирали почвенный монолит рамкой 25×25 см на глубину органогенного горизонта (подстилки), закладывали почвенный разрез, измеряли мощность органогенных и минеральных горизонтов (рис. 2).

На каждой ПП закладывали три полнопрофильных разреза (до горизонта С) в межкрупных пространствах и три почвенные прикопки (до горизонта В) — под кронами деревьев. Для измерения плотности, доли мелкозема, содержания и запасов органического углерода (Сорг.) в минеральных гори-

зонтах, пробы отбирали почвенным буром (гор. Е, ВНФ, С). В лабораторных условиях почвенный монолит разбирали, отделяли надземную и подземную фитомассу. Пробы почвы высушивали при комнатной температуре, взвешивали и просеивали. Рассчитывали абсолютно сухую массу органогенных и минеральных горизонтов. Аналитической обработке подвергали мелкозем (фракция <2,0 мм). Актуальную кислотность (рН) измеряли потенциометрически в водной вытяжке согласно ГОСТ 26423-85 [30], используя соотношение почва: раствор для органогенных горизонтов как 1:25, минеральных горизонтов — 1:2,5. Содержание углерода в почве и растениях определяли на элементном анализаторе CHNS EMA 502 (VELP, Италия). Для определения запасов Сорг. использовали собственные аналитические данные по мощности, плотности почвенных горизонтов и содержанию в них углерода. Расчет



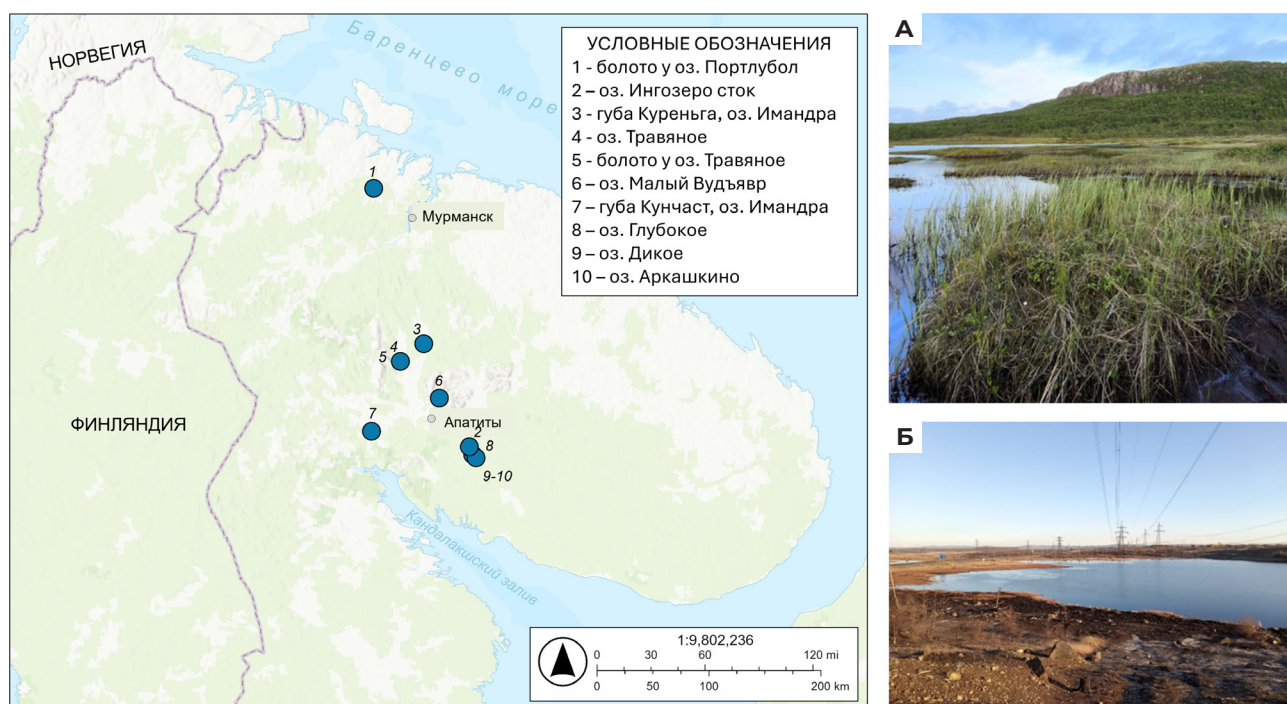
**Рис 2.** Почвенный разрез (А) и почвенный монолит (Б), полевые исследования на пробной площади в зоне расположения АО «Кольская ГМК»

**Fig. 2.** Soil profile (A) and soil monolith (B) collected at a sampling plot in the impact zone of JSC «Kola MMC»

запаса углерода в органогенном почвенном горизонте (O) проводили путем умножения абсолютно сухой массы почвы на содержание углерода, в минеральных горизонтах (E, BHF, C) — путем умножения мощности соответствующего горизонта на плотность, долю мелкозема и содержание в нем углерода. Оценка вариабельности содержания и запасов углерода в почве проводилась с применением программного обеспечения MS Excel через оценку средних значений и стан-

дартной ошибки методами описательной статистики. Для сравнения содержания и запасам углерода в почве ненарушенных (фоновых) экосистем и техногенных редколесий использовали *U*-критерий Манна—Уитни.

**Водные экосистемы.** Исследования водных и болотных экосистем были проведены в безледный период 2024–2025 гг. Объекты исследования и отобранный материал представлен на рис. 3 и табл. 2. Отбор проб



**Рис. 3.** Карта-схема расположения пробных площадей водных и болотных экосистем в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) и на фоновых территориях. Примечание: А — вид на заболоченный участок оз. Портлубол, Б — вид оз. Травяного и приозерной низменности

**Fig. 3.** Sampling plots of aquatic and peatland areas in the impact zone of JSC “Kola MMC”. (Monchegorsk site) and in background areas. Note: A — wetland of Lake Portlubol, B — Lake Travyanoye and adjacent lowlands

**Таблица 2.** Объекты исследования водных и болотных экосистем

**Table 2.** Sampling sites of aquatic and peatland ecosystems

№	Объект исследования The object of research	Координаты (WGS 84) Coordinates(WGS 84)		Материал Material
		Широта Width	Долгота Longitude	
1	Озеро Травяное	67,941277	32,850522	вода, ДО
2	Болото у оз. Травяного	67,938015	32,847749	торф
3	Болото у оз. Портлубол	69,194283	32,311829	торф
4	Озеро Дикое	67,237358	34,266393	вода, ДО
6	Озеро Малый Вудъявр	67,666847	33,611630	вода
7	Озеро Глубокое	67,293507	34,218174	вода
8	Озеро Аркашкино	67,213291	34,353285	вода
9	Озеро Ингозеро сток	67,237358	34,266393	вода
10	Губа Куреньга, озеро Имандра	68,073228	33,314591	вода
11	Губа Кунчаст, озеро Имандра	67,411866	32,271439	вода

донных отложений (ДО) был выполнен с помощью трубчатого пробоотборника (диаметром 8,5 см) открытого гравитационного типа с автоматически закрывающейся диафрагмой, разработанного по схеме, предложенной Скогхеймом [31], керны торфяных отложений — посредством торфяного геологического бура [32]. Отбор проб воды для анализа содержания углерода был осуществлен с помощью стандартного батометра Руттнера объемом 2,2 л, в подготовленные химически инертные пластиковые бутылки объемом 1 л. Для контроля исследуемых параметров также был произведен отбор воды из озер, не подверженных непосредственному влиянию загрязнителей, расположенных на значительном удалении от источников антропогенного воздействия. В качестве фоновых были выбраны разнотипные озера, отличающиеся морфометрией, географическим положением и условиями формирования качества вод.

Подготовка проб и аналитические процедуры были выполнены в соответствии с рекомендованными стандартными методиками, принятыми в международной и отечественной практике по схеме, принятой в ИППЭС КНЦ РАН [32].

Анализ потерь при прокаливании, которые характеризуют содержание органического вещества в (органические соединения выгорают обычно в диапазоне температуры от 100 до 500 °С), проводится весовым способом после прокалывания образцов при температуре 500 °С в муфельной печи. Для оценки химического состава отложений и торфа, включая содержание углерода, образцы просушивались в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С до постоянного веса изучаемых образцов. Далее пробы измельчались до порошкообразного состояния на лабораторном истирателе или в ступке при помощи пестика. Определение углерода в пробах проводилось по методикам изучения почвы на аналогичном оборудовании в ИППЭС КНЦ РАН.

Расчет запаса углерода, измеряемый в т/га, в торфе и донных отложениях согласно следующей формуле:

$$C_{\text{зап.}} = L_{\text{зап.}} \times C / 1000 ,$$

где  $L_{\text{зап.}}$  — это запас слоя, рассчитываемый как отношение сухого веса осадка в этом

слое к площади берущей части пробоотборника, а  $C$  — концентрация (в мг/кг) углерода в изучаемом слое.

## Результаты и обсуждение

**Наземные экосистемы.** Основными средообразующими природными факторами в Мурманской области, определяющими варьирование циклов углерода в наземных экосистемах, являются климат, рельеф, почвы и почвообразующие породы, растительность. На функционирование лесных экосистем наряду с природными значительное влияние оказывают антропогенные факторы — рубки, пожары, воздушное промышленное загрязнение [33].

Промышленная деятельность оказывает значительное влияние на структурно-функциональную организацию лесных биогеоценозов, обуславливает пространственную неоднородность накопления и разложения органического вещества, способствует изменению запасов углерода в подстилке и минеральных почвенных горизонтах [34]. Изменение количества органического вещества в наземных экосистемах, вызываемое техногенным загрязнением, выражается в нарушении соотношения процессов его продуцирования, аккумуляции, отмирания и депонирования.

Для количественной характеристики депонирования углерода в почве используется величина его запаса, вычисленная из расчета выбранного объема почвы: на 1 м<sup>2</sup>, 1 га, на слое (например, 0–50 или 0–100 см) или на генетический горизонт [35]. Данные по запасам углерода в почвах — важная составляющая баланса углерода в наземных экосистемах. В настоящее время оценка содержания и запасов углерода в почвах приобрела особую значимость в связи с глобальными климатическими изменениями [9, 36–38]. На современном этапе накопилось немалое количество работ по оценке глобальных и региональных запасов органического углерода в почвах [8, 16, 39–41]. В Мурманской области депонирующая способность почв региона до сих пор остается слабо изученной. Особый интерес представляют особенности депонирования углерода в репрезентативных экосистемах региона, в том числе в зоне расположения промышленных предприятий.

Почвы на пробных площадях представлены альфегумусовыми подзолами с типичным для них профилем: O–E–BHF–C [42], развивающиеся на моренных отложениях. Данные почвы являются типичными для лесных экосистем Мурманской области, имеют небольшую мощность подстилки (органогенного горизонта), невысокие запасы органического вещества, реакция среды обычно кислая.

Мощность органогенного горизонта на исследуемых пробных площадях варьировала в фоновых условиях от 6 до 12 см, в зоне воздействия АО «Кольская ГМК» — от 8 до 11 см. Доля мелкозема в минеральных горизонтах почвы ненарушенных экосистем варьировала от 86 до 100%, техногенном редколесье — от 75 до 97 %. Плотность почвы сопоставима по двум пробным площадям и составляет в среднем 1,2–1,3 г/см<sup>3</sup>. Вниз по почвенному профилю наблюдается снижение кислотности от органогенного горизонта к почвообразующей породе (табл. 2).

При оценке углерододепонирующей роли лесных почв Севера крайне важным является учет содержания углерода в подстилке [43]. Среднее содержание углерода в верхнем органогенном горизонте почв (подстилке) в фоновых условиях в техногенных редколесьях сопоставимо и составляет 48 % (табл. 3), диапазон варьирования составляет от 43 до 52 %.

Минеральные горизонты в разной степени обогащены органическим веществом и имеют схожие тенденции распределения

по профилю углерода на обследованных пробных площадях (табл. 3). Иллювиальный горизонт (гор. BHF) является горизонтом максимальной аккумуляции углерода, содержание варьирует от 0,46 до 2,01% в фоновых условиях и от 1,97 до 4,37% — в техногенном редколесье. Подзолистый горизонт (гор. E) содержит меньше углерода: от 0,20 до 0,69 % в ненарушенных экосистемах и от 0,88 до 1,69 % — в зоне воздействия АО «Кольская ГМК». В почвообразующей породе содержание углерода снижается и варьирует на пробных площадях в диапазоне от 0,59 до 1,30 %. Подобный характер распределения Сорг. по почвенному профилю является одной из генетических особенностей подзолов [44]. Результаты исследований показали, что в техногенном редколесье содержание углерода в минеральных горизонтах (E, BHF) достоверно выше ( $p < 0,05$ ) по сравнению с фоновыми значениями (табл. 2).

В фоновых условиях и техногенном редколесье запасы углерода по почвенному профилю изменяются следующим образом: максимальные значения характерны для подстилки и иллювиального горизонта BHF, минимальные — для подзолистого горизонта E и почвообразующей породы E и почвообразующей породы E (табл. 3). В ненарушенных (фоновых) лесных экосистемах запас подстилки в среднем составляет 54 т/га, в углеродном эквиваленте это соответствует 22т С/га. Полученные данные согласуются с результатами, которые приведены для подзоны северной тайги в Республике Коми, где запасы подстилки составляли от 26 до 57 т/га, запасов

**Таблица 3.** Кислотность, содержание и запасы углерода в почвенных горизонтах Al-Fe-гумусовых подзолов (2024–2025 гг.) северотаежных лесов

**Table 3.** Acidity, carbon content, and carbon stocks in soil horizons of Al-Fe-humus podzols (2024–2025) in northern taiga forests

Почвенный горизонт Soil horizon	Фон Background areas			Техногенноередколесье (ПП № 46-24) Pollution-induced sparse forests		
	pH	Содержание C, % Carbon Content, %	Запасы C, т/га Carbon reserves, t/ha	pH	Содержание C, % Content C, %	Запасы C, т/га Carbon reserves, t/ha
O	4,62 0,13	48,42 0,57	22,49 4,25	4,73 0,15	47,63 1,96	41,59 4,08
E	4,37 0,04	0,44 0,07	3,84 1,12	5,20 0,17	1,37 0,18	12,40 4,80
BHF	5,16 0,09	1,36 0,26	20,91 3,90	5,32 0,15	3,49 0,58	51,11 4,87
C	5,32 0,08	0,89 0,21	7,62 0,91	5,58 0,04	0,86 0,17	8,27 1,55

Примечание: над чертой — среднее значение, под чертой — стандартная ошибка.  
Note: above the line is the mean value, and below the line is the standard error.

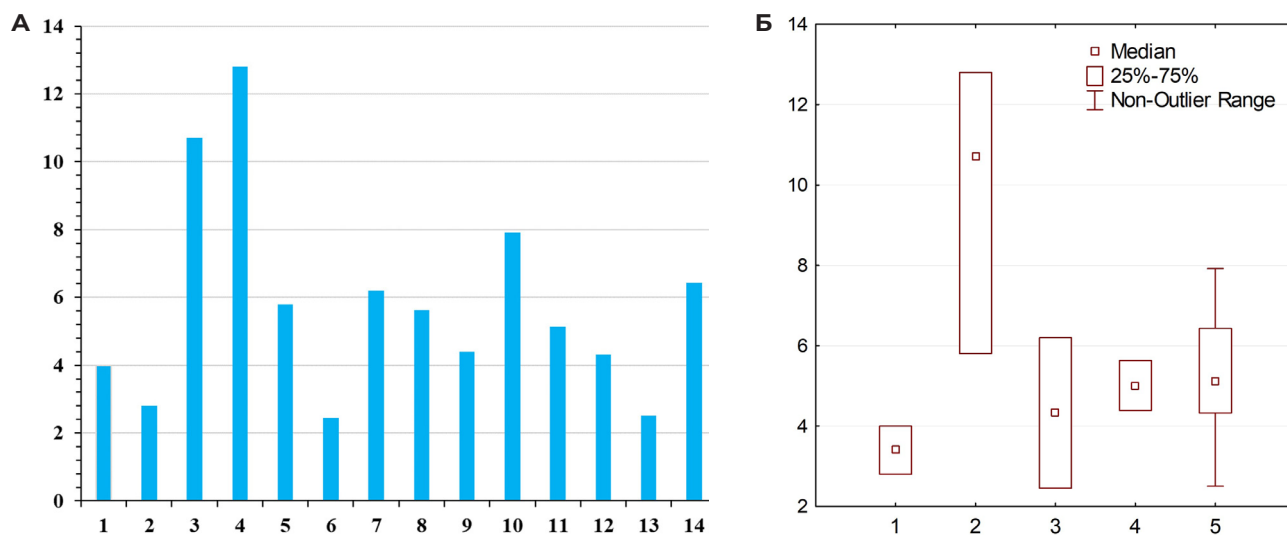
углерода— от 12 до 27 т С/га [36]. Достаточно большие запасы подстилки в северотаежных лесах обусловлены невысокой скоростью разложения органических остатков.

В зоне воздействия АО «Кольская ГМК», в техногенном редколесье наблюдается достоверное увеличение ( $p < 0,05$ ) запасов подстилки (96 т/га) и углерода (42 т С/га) по сравнению с фоном. Увеличение запасов подстилки на ПП № 46-24 может свидетельствовать о накоплении здесь неразложившихся органических остатков (замедлении скорости деструкции), изменении продуктивности лесной экосистемы и подавлении активности почвенных микроорганизмов в условиях техногенного воздействия. В минеральных почвенных горизонтах Е и ВНН запасы углерода также возрастают ( $p < 0,05$ ) в 3,2 и в 2,4 раза соответственно относительно регионального фона (табл. 3). В почвообразующей породе (гор. С) запасы углерода были сопоставимы по двум исследованным пробным площадям.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что почвы в зоне воздействия АО «КГМК» обладают значительными запасами почвенного углерода

в техногенных редколесьях и значительно превышают фоновые значения.

**Водные экосистемы.** В воде оз. Травяного, находящегося в зоне влияния АО «Кольская ГМК», содержание NPOC (Non-Purgeable Organic Carbon) на период отбора составило 4,00 мгС/л, при этом в воде отстойника оз. Нюдъявр его концентрация была ниже — 2,80 мгС/л. Установлено, что значение концентраций NPOC в воде имеет сравнительно широкий диапазон значений (рис. 4а). В глубоководном оз. Дикое (Печенгский район Мурманской области) в поверхностных слоях воды, а также на глубине 30 м содержание NPOC оказалось выше на порядок по сравнению с другими изученными водными объектами. При этом на глубине 50 м концентрация органического углерода составила 5,80 мг/л. В горном озере Малый Вудъявр, расположенном в Хибинском горном массиве, концентрация NPOC составила 2,45 и 6,20 на глубинах 1 и 12 метров соответственно. Сопоставимые значения были выявлены и для самого крупного внутреннего водоема региона — оз. Имандра, где концентрации NPOC составили 5,63 и 4,39 на глубинах 1 и 25 метров соответственно. В водоемах, расположенных



**Рис. 4.** А — содержание общего органического углерода (NPOC) в воде исследованных водоемов, мгС/л: 1 — Травяное, 2 — отстойник оз. Нюдъявр, 3, 4, 5 — оз. Дикое, глубина 1, 20 и 50 м соответственно, 6, 7 — оз. Малый Вудъявр, глубина 1 и 12 м соответственно, 8, 9 — оз. Бабинская Имандра, глубина 1 и 25 м соответственно, 10 — оз. Аркашкино малое, 11 — оз. Аркашкино среднее, 12 — оз. Аркашкино, 13 — оз. Глубокое, 14 — оз. Ингозеро, сток; Б — сравнение содержания NPOC водоемов разных ландшафтов: 1 — Мончегорская площадка, 2 — Печенгский район, 3 — Хибинский горный массив, 4 — оз. Имандра, 5 — озера зоны северной тайги.

**Fig. 4.** А — Concentration of non-purgeable organic carbon (NPOC) in waters of the studied lakes, mg C/L: 1 — Travyanoye; 2 — settling pond of Lake Nyud'yavr; 3, 4, 5 — Lake Dikoye (depths 1, 20, and 50 m); 6, 7 — Lake Maly Vud'yavr (depths 1 and 12 m); 8, 9 — Babinskaya Imandra (depths 1 and 25 m); 10 — Lake Arkashkino Maloe; 11 — Lake Arkashkino Srednee; 12 — Lake Arkashkino; 13 — Lake Glubokoe; 14 — Lake Ingozero, outflow. Б — Comparison of NPOC concentrations across landscape types: 1 — Monchegorsk site; 2 — Pechenga District; 3 — Khibiny Mountains; 4 — Lake Imandra; 5 — lakes of the northern taiga zone

в таежной зоне, концентрации NPOC варьировали от 2,50 до 7,92 (рис. 4А). В целом в водоемах в зоне влияния АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) содержание органического углерода в среднем (по медиане) оказалось ниже, чем во всех остальных изученных водных объектах различных ландшафтов (рис. 4Б).

Высокая вариативность значений концентрации NPOC объясняется, вероятно, не только разницей в типологии озер и биогеохимических особенностях ландшафтов, но и активностью биоты. Основные процессы биогеохимического цикла углерода в озерных экосистемах включают поглощение углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) фотоавтотрофными организмами (водоросли, цианобактерии и высшие растения); продукцию органического вещества, и частичное ее захоронение в виде донных отложений, а также деструкционные процессы минерализации, с последующим выбросом  $\text{CO}_2$  в атмосферу [45]. Поэтому непосредственное влияние на содержание углерода оказывает уровень развития планктона, который играет ключевую роль в циклах углерода в водных экосистемах. В свою очередь, уровень развития планктона в специфических условиях Арктики подвержен значительным колебаниям в течение короткого гидробиологического лета, что затрудняет адекватную оценку запасов углерода непосредственно в водной среде. Очевидно, необходимо использовать данные о гидробиологической активности и роли отдельных групп организмов в циклах углерода в водоемах.

Было показано [46], что основной вклад в общий пул углерода внутренних водоемов северных широт вносит аллохтонная органика, которая уже подверглась той или иной форме деградации перед попаданием в водную экосистему. Увеличение автохтонной составляющей в результате развития процессов эвтрофирования (в том числе антропогенного) и потепления климата может привести к увеличению продуктивности вод, и как следствие, увеличению потоков парниковых газов с поверхности водоемов [47]. В связи с этим при анализе запасов углерода в водных экосистемах необходимо оценивать трофический статус вод. На основе полученных данных сложно сделать выводы о величине антропогенного вклада в динамику депонирования углерода в воде изученных озер.

**Донные и торфяные отложения.** Запасы углерода в донных отложениях (ДО) озера Травяного варьируют от 7,8 до 30 т/га (рис. 5). Максимальные значения запасов С приходятся на верхние слои отложений от 3 до 10 см, что хорошо коррелирует с данными по общему накоплению углерода в отложениях озера Травяного. Кроме того, значения запасов С в верхних слоях ДО озера Травяного близки к данным по запасам углерода в органогенных горизонтах лесных почв Мурманской области (27–34 т/га) [33]. На основе полученных данных по вертикальному распределению углерода и его запасов, можно говорить о том, что повышение уровня накопления углерода в ДО этого водоема связано с антропогенной деятельностью

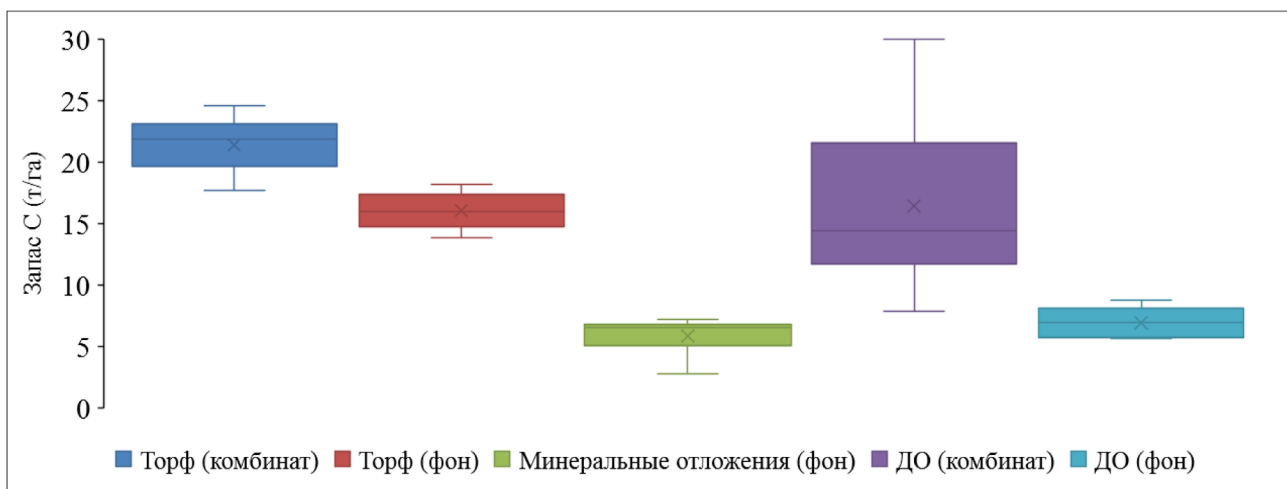


Рис. 5. Сравнение уровней запасов углерода в торфе, минеральных отложениях и донных осадках (ДО) разных районов Мурманской области

Fig. 5. Comparison of carbon stocks in peat, mineral deposits, and bottom sediments across districts of Murmansk Region

в районе исследования. Средний запас С в ДО фонового озера Дикого составляет около 7 т/га, что близко к значениям запасов С в нижних (вероятно, фоновых) слоях отложений озера Травяного. Эти исследования необходимо продолжать, однако уже сейчас видно, что метод палеолимнологических реконструкций позволяет выявлять темпы и объемы накопления С в озерах, расположенных в районах с повышенной антропогенной активностью.

Содержание углерода в торфяных отложениях южного берега оз. Травяного изменяется от 281 до 458 тыс. мг/кг. Медианное по профилю значение составляет 426 тыс. мг/кг. Максимальное содержание углерода было выявлено в нижних слоях торфяных отложений в интервале 70–80 см, минимальное — в поверхностных слоях от 0 до 30 см. В целом распределение характеризуется снижением величины содержания углерода в поверхностных слоях. Запасы углерода в слоях различного возраста варьируют от 17,7 до 24,5 т/га (рис. 5). При этом распределение запасов углерода не вполне соответствует его концентрациям в отложениях. Максимальные значения запасов С приходятся на слои отложений в интервале 45–57 см, минимальные (17,7 т/га) — в самых древних слоях в интервале 90–97 см. Сравнительно невысоки запасы углерода также в современных торфяных отложениях — 19,6 т/га. В отличие от донных отложений наблюдается снижение запасов углерода, начиная с середины профиля к поверхностным слоям. Не исключено, что это объясняется деградацией растительности и снижением темпов торфообразования на водосборной площади оз. Травяного в результате антропогенной деятельности.

Анализ содержания углерода в керне торфа болота у оз. Портлубол показал, что с повышенным содержанием органики и С можно считать верхние слои от 20 до 45 см. В этих слоях концентрация С варьирует от 31,4 до 42,1 % при среднем содержании С 35,7%. В более глубоких слоях исследованного керна, где отмечалось большое число песчаных частиц, содержание углерода существенно ниже — от 6,2 до 10,9 %.

Сопоставление данных по запасам углерода в разных средах показало, что торфяные отложения имеют наибольшие значения этого показателя, так как торф, более чем на 50%

состоит из органических остатков. При этом торфяные отложения, отобранные вблизи промышленного объекта (район вблизи г. Мончегорска), имеют более высокие значения запасов С по сравнению с торфами болота фонового района на севере региона. В определенной степени это связано с антропогенными выбросами от АО «Кольская ГМК». Известно, что в результате антропогенного воздействия в современных осадочных формациях увеличивается уровень накопления и запаса углерода [48].

Донные отложения вблизи комбината также имеют повышенные уровни запаса углерода, особенно это касается самых верхних слоев отложений (рис. 5). Минимальный уровень запаса С отмечен для минеральных отложений, представленных преимущественно ледниковыми образованиями, а также для минеральных типов донных отложений, которые были взяты за фон в данной работе. Здесь решающую роль играет общее минимальное содержание органического вещества.

### Рекомендации по дальнейшему мониторингу пулов и потоков углерода в наземных и водных экосистемах в зоне воздействия АО «Кольская ГМК»

По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по дальнейшему мониторингу климатически активных веществ в наземных и водных экосистемах в зоне воздействия АО «Кольская ГМК».

Следует отметить, что получение данных по пулам и потокам углерода в экосистемах отдельных регионов, а также оценка вклада отдельных компонентов экосистем (воды, почвы, торфа, донных отложений) в общий углеродный баланс в настоящее время особенно актуальны.

На территории Мурманской области представлены различные сукцессионные стадии лесов, обусловленные комбинированным действием естественных и антропогенных факторов. С 1990-х гг. Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН проводит биогеохимический мониторинг и имеет уникальную базу данных по динамике потоков углерода в северо-таежных лесах на фоновых и нарушенных

территориях [49, 50]. Однако результатов исследований, на основании которых можно сделать определенные заключения о связи между сукцессионным статусом лесов и закономерностями накопления и динамики углерода в них, недостаточно.

Совместная работа ученых и промышленников позволила оценить запасы почвенного углерода в наземных экосистемах в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск). Получены уникальные данные по запасам углерода в почве и изменению содержания и запасов углерода вниз по почвенному профилю. Почва — важнейший, но не единственный компонент фитосеносов, определяющий углерододепонирующую способность экосистем. Для полных и объективных оценок бюджета углерода в наземных экосистемах необходимо определение запасов надземной и подземной фитомассы, запасов углерода в древостое и напочвенных ярусах (травяно-кустарничковом, мохово-лишайниковом). Необходимо продолжать мониторинговые исследования пулов и потоков углерода в зоне расположения АО «Кольская ГМК» по следующим направлениям исследований: 1) изучение состояния, структуры, продуктивности древостоев на основе данных таксационных исследований на пробных площадях; 2) описание видового разнообразия для учета вклада различных групп биоты (сосудистые растения, мохообразные, лишайники) в бюджет углерода наземных экосистем на основе данных геоботанических исследований; 3) оценка продукции и запасов органического вещества в фитомассе и мортмассе наземных экосистем; 4) учет вклада почвенной эмиссии парниковых газов в углеродный баланс репрезентативных наземных экосистем. Реализация перечисленных задач позволит оценить бюджет углерода наземных экосистем с учетом всех компонентов (атмосферные выпадения, почва, растительность, опад). Это станет научной основой для разработки новых подходов и принципов управления наземными природными ресурсами Арктики в условиях глобальных и региональных изменений окружающей среды, а также по адаптации экосистем к климатическим изменениям и достижению углеродной нейтральности в регионе.

С учетом реализации отдельных элементов «углеродной политики» промышленными предприятиями, очевидна необходимость

получения точной количественной оценки углеродопоглощающей способности внутренних водоемов региона. Научно обоснованная оценка способности водно-болотных экосистем связывать значительное количество двуокси углерода, входящей в состав промышленных выбросов, позволит предприятиям сокращать углеродный след своей продукции в соответствии с актуальными тенденциями рынка.

Перспективы исследований способности к депонированию углерода различными компонентами водных экосистем в зоне воздействия объектов компании АО «Кольская ГМК» на основе проведенных исследований имеют несколько важных аспектов, а именно:

- расширение современных представлений о ключевой роли вод, донных отложений и элементов водосборной площади в накоплении углерода. Понимание механизмов углеродного цикла в компонентах водных экосистем может играть важную роль в выявлении интенсивности и направленности климатических изменений Арктики, оценке здоровья и устойчивости экосистем с точки зрения реализации экосистемных услуг;
- применение результатов исследований в разработке стратегий управления водными ресурсами, более глубокому изучению биогеохимических циклов и взаимодействий между различными компонентами экосистем.

Полученные результаты позволяют заключить, что перспективными направлениями исследований водных экосистем являются следующие: 1) выявление роли водной биоты в углеродных циклах, количественная оценка продукционных и деструкционных процессов, вклада отдельных групп организмов, в первую очередь фотоавтотрофов (водорослей и цианобактерий), а также высшей водной растительности. Анализ вклада гетеротрофного дыхания и уровня мортмассы в торфяных и донных отложениях, оценка запасов и скорости разложения фитомассы и формирования торфов в голоцене, изучение особенностей происхождения торфяных отложений с учетом их возраста; 2) оценка потоков аллохтонного органического вещества водоемы, и вклад этих потоков в экосистемные углеродные циклы; оценка количественного

соотношения форм миграции и аккумуляции углерода; 3) изучение концентрации и распределения углерода в донных отложениях водоемов различных ландшафтов Мурманской области, выявление диапазонов содержания в зависимости от типологии и происхождения осадков, литологических и геохимических особенностей, возраста, темпов осадконакопления.

На основании результатов комплексных исследований может быть дана объективная количественная оценка способности наземных и водно-болотных экосистем к связыванию двуокси углерода атмосферы.

## Заключение

Проведенные исследования пулов и потоков углерода в наземных и водных экосистемах Мурманской области позволили установить некоторые ориентировочные величины концентраций и запасов углерода в воде, донных озерных отложениях, почве и торфе. Установлено, что величины запасов углерода в верхних слоях озерных отложений близки к данным по запасам углерода в органогенных горизонтах лесных почв Мурманской области. Почвы в зоне воздействия АО «КГМК» (площадка Мончегорск) обладают значительными запасами почвенного углерода в техногенных редколесьях. Увеличение запасов почвенного углерода в условиях промышленного воздействия может быть связано со снижением скорости разложения органических остатков в условиях атмосферного загрязнения. Торфяные отложения, отобранные вблизи промышленного объекта, также имеют более высокие значения запасов углерода по сравнению с торфами болота фонового района на севе-

ре Мурманской области. В озере Травяном, расположенном в зоне техногенного воздействия, выявлены повышенные уровни накопления углерода в донных отложениях, максимальные запасы углерода отмечены в верхних слоях. В воде озер в зоне влияния АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) содержание органического углерода оказалось ниже, чем во всех остальных изученных водных объектах.

Полученные результаты свидетельствуют о значительной роли наземных и водных экосистем в аккумуляции углерода депонирующими средами. В то же время недостаточно информации о диапазонах запасов углерода, формирующихся в условиях различных ландшафтов, что необходимо для адекватной оценки эффективности взаимодействия аккумулярующих сред с атмосферой. Существует необходимость продолжения комплексных исследований пулов и потоков углерода с учетом всех компонентов экосистем на основе различных показателей, характеризующих их структурно-функциональную организацию.

Результаты работы будут способствовать совершенствованию национальной системы мониторинга климатически активных веществ и планированию компенсационных мероприятий, направленных на сокращение содержания парниковых газов в атмосфере. Дальнейшие исследования позволят оценить потенциал северных экосистем по депонированию углерода, разработать научно-методические рекомендации по адаптации экосистем к климатическим изменениям и достижению углеродной нейтральности в регионе, в том числе при реализации климатических проектов.

## Литература

1. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R., Fang J., Kauppi P.E., Keith H., Kurz W.A., Ito A., Lewis S.L., Nabuurs G., Shvidenko A., Hashimoto S., Lerink B., Schepaschenko D., Castanho A., Murdiyars D. The enduring world Forest carbon sink. *Nature*. 2024;631:536–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
2. Pappas C., Maillet J., Rakowski S., Baltzer J.L., Barr A.G., Black T.A., Fatichi S., Laroque C.P., Matheny A.M., Roy A., Sonnentag O., Zha T. Aboveground tree growth is a minor and decoupled fraction of boreal forest carbon input. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020;290:108030. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108030>
3. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew M.R., Bakker D.C.E., Hauck J., et al. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*. 2023;15(12):5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>

4. Adoption of the Paris agreement. 2015. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
5. Framstad E., de Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karlton E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forest. Copenhagen: Nordic Council of Ministers; 2013. <https://doi.org/10.6027/tn2013-507>
6. Schlesinger W.H. Carbon balance in terrestrial detritus. Annual Review of Ecology and Systematics. 1977;8:51–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.08.110177.000411>
7. Post W.M., Emanuel W.R., Zinke P.J., Stangenberger A.G. Soil carbon pools and world life zones. Nature. 1982;298(5870):156–159. <https://doi.org/10.1038/298156a0>
8. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and. Global and Planetary Change. 2015;128:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>
9. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). Forestry: An International Journal of Forest Research. 2019;92(1):264–277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy035>
10. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России. Почвоведение. 2013;(2):123–132. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>
11. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. Санкт-Петербург: Наука; 2014.
12. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Почикалов А.В., Кудяров В.Н. Физические свойства и изменение запасов углерода серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области). Почвоведение. 2017;(3):345–353. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1703002X>
13. Бахмет О.Н. Запасы углерода в почвах сосновых и еловых лесов Карелии. Лесоведение. 2018;(1):48–55. <https://doi.org/10.7868/S0024114818010047>
14. De Vos B., Cools N., Ilvesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey. Geoderma. 2015;251–252:33–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>
15. Hounkpatin K.O.L., Stendahl J., Lundblad M., Karlton E. Predicting the spatial distribution of soil organic carbon stock in Swedish forests using a group of covariates and site-specific data. Soil. 2021;7(2):377–398. <https://doi.org/10.5194/soil-7-377-2021>
16. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. Geoderma Regional. 2021;27(2):e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2021.e00427>
17. Kortelainen P., Rantakari M., Huttunen J.T., Mattsson T., Alm J., Juutinen S., Larmola T., Silvola J., Martikainen P.J. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO<sub>2</sub> evasion from small boreal lakes. Global Change Biology. 2006;12(8):1554–1567. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01167.x>
18. Лим А.Г., Лойко С.В., Крицков И.В., Кузьмина Д.М. Структурно-функциональные особенности ландшафтов с активным термокарстом в северной тайге Западной Сибири. Ukrainian Journal of Ecology. 2017;(4):414–423. [https://doi.org/10.15421/2017\\_136](https://doi.org/10.15421/2017_136)
19. Сабылина А.В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах. Труды Карельского научного центра РАН. 2016;(9):68–77. <https://doi.org/10.17076/lim307>
20. Головацкая Е.А., Веретенникова Е.Э., Дюкарев Е.А. Потоки парниковых газов и депонирование углерода в олиготрофных торфяных почвах южной тайги Западной Сибири. Почвоведение. 2024;(2):226–236. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24020023>
21. Леонова О.А., Волкова Е.М. Запасы углерода в торфяных залежах водораздельных болот на северо-востоке среднерусской возвышенности. Труды Карельского научного центра РАН. 2023;(8):20–27. <https://doi.org/10.17076/eco1845>
22. ГОСТ 31958-2012. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода» (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2012 г. N 1907-ст) [интернет]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/71231976/> (дата обращения: 25.03.2026).

23. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [интернет]. Режим доступа: [https://base.garant.ru/400274954/#block\\_1000](https://base.garant.ru/400274954/#block_1000) (дата обращения: 25.03.2025).
24. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в лесных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН; 2024.
25. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в болотных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Ханты-Мансийск; 2024.
26. Методические рекомендации по оценке поступления растворенного органического углерода с атмосферными выпадениями. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН; 2024.
27. Методические рекомендации по пробоподготовке и проведению физико-химического анализа почвенных и растительных образцов. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН; 2024.
28. Методические рекомендации по проведению химического анализа природных вод. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН; 2024.
29. Методика мониторинга лесов по международной программе ICP Forests. Москва: ЦЭПЛ РАН, Российский центр защиты леса; 2008.
30. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки [интернет]. Режим доступа: <https://files.stroy-inf.ru/Data2/1/4294828/4294828015.pdf> (дата обращения: 23.03.2025)
31. Skogheim O.K. Rapport fra Arungenprosjektet. Ås-NLH-Report No. 2. Oslo: Norges landbrukskøleskole (NLH); 1979.
32. Сандимиров С.С., Кудрявцева Л.П., Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Косова А.Л., Черепанов А.А. Методы экологических исследований водоемов Арктики. Мурманск: Издво МГТУ; 2019.
33. Сухарева Т.А., Иванова Е.А., Ершов В.В., Зенкова И.В., Корнейкова М.А., Штабровская И.М., Сошина А.С. Содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области. Вопросы лесной науки. 2023;6(2):125. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202362-125>
34. Живов Д.А., Сухарева Т.А. Запасы азота и углерода в почвах еловых лесов Мурманской области. Вестник Нижневартского государственного университета. 2025;(4):84–100. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>
35. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. Москва: Наука; 1996.
36. Бобкова К.С., Галенко Э.П. (ред.). Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. СПб.: Наука; 2006.
37. Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Tebenkova D., Knyazeva S., Bakhmet O., Kryshen A., Shashkov M. Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia. Forests. 2020;11(9):979. <https://doi.org/10.3390/f11090979>
38. Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. Carbon Management. 2014;5(1):81–91. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.77>
39. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. Москва: ГЕОС; 2020.
40. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе. Почвоведение. 2020;(3):340–350. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2003002X>

41. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Добровольская В.А., Кондрашкина М.И., Дядькина С.Е., Филиппова О.И., Кротов Д.Г., Морозова Т.М., Красильников П.В. Исследование неопределенности запасов органического углерода в масштабах угодий. Почвоведение. 2023;(11):1437–1449. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2311010X>
42. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена; 2004.
43. Черкинский А.Е., Чичагова О.А. Типы органофильных почв мира. В: Глобальная география почв и факторы почвообразования: сб. ст. Москва; 1991, с. 164–195.
44. Переверзев В.Н. Почвообразование на рыхлых и кристаллических породах в Северной Фенноскандии. Апатиты: Изд. КНЦ РАН; 2013.
45. Denfeld B., Lupon A., Sponseller R., Laudon H., Karlsson J. Heterogeneous CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> patterns across space and time in a small boreal lake. *Inland Waters*. 2020;10(3):348–359. <https://doi.org/10.1080/20442041.2020.1787765>
46. Paerl H.W., Otten T.G. Blooms bite the hand that feeds them. *Science*. 2013;342(6157):433–434. <http://doi.org/10.1126/science.1245276>
47. Чупакова А.А., Чупаков А.В., Неверова Н.В., Прасолов С.Д., Забелина С.А. Растворенный органический и неорганический углерод в разнотипных озерах бореальной зоны. Проблемы региональной экологии. 2023;(6):49–55. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-6-49-55>
48. Белкина Н.А. Закономерности осадконакопления и раннего диагенеза донных отложений в водоемах юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита [диссертация]. Санкт-Петербург; 2021.
49. Сухарева Т.А., Ершов В.В. Запасы углерода в почвах северотаежных лесов Мурманской области в условиях регионального фона и при аэротехногенном загрязнении. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2024624518. Оpubл. 17.10.2024.
50. Сухарева Т.А., Иванова Е.А., Рябов Н.С., Ершов В.В., Живов Д.А. Запасы и содержание углерода и азота в фитомассе еловых лесов геохимически сопряженных ландшафтов (Мурманская область). Свидетельство о регистрации базы данных RU 2025623969. Оpubл. 23.09.2025.

## References

1. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R., Fang J., Kauppi P.E., Keith H., Kurz W.A., Ito A., Lewis S.L., Nabuurs G., Shvidenko A., Hashimoto S., Lerink B., Schepaschenko D., Castanho A., Murdiyars D. The enduring world Forest carbon sink. *Nature*. 2024;631:536–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
2. Pappas C., Maillet J., Rakowski S., Baltzer J.L., Barr A.G., Black T.A., Fatichi S., La-roque C.P., Matheny A.M., Roy A., Sonnentag O., Zha T. Aboveground tree growth is a minor and decoupled fraction of boreal forest carbon input. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020;290:108030. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108030>
3. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M.W., Andrew M.R., Bakker D.C.E., Hauck J., et al. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*. 2023;15(12):5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
4. Adoption of the Paris agreement. 2015. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
5. Framstad E., de Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karlton E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forest. Copenhagen: Nordic Council of Ministers; 2013. <https://doi.org/10.6027/tn2013-507>
6. Schlesinger W.H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1977;8:51–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.08.110177.000411>
7. Post W.M., Emanuel W.R., Zinke P.J., Stangenberger A.G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*. 1982;298(5870):156–159. <https://doi.org/10.1038/298156a0>
8. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and. *Global and Planetary Change*. 2015;128:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>
9. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2019;92(1):264–277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy035>

10. Shchepashchenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(2):107–116. <https://doi.org/10.1134/s1064229313020129>
11. Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V. Dynamics of organic matter carbon content in middle taiga spruce forests on automorphic soils. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2014. (In Russ.).
12. Baeva Yu.I., Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Pochikalov A.V., Kudiyarov V.N. Changes in physical properties and carbon stocks of gray forest soils in the southern part of Moscow region during postagrogenic evolution. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(3):327–334. <https://doi.org/10.1134/s1064229317030024>
13. Bakhmet O.N. Carbon Deposits in Soils of Pine and Spruce Forests of Karelia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2018;11(7):697–703. <https://doi.org/10.7868/S0024114818010047>
14. De Vos B., Cools N., Ilvesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale for est soil survey. *Geoderma*. 2015;251–252:33–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>
15. Hounkpatin K.O.L., Stendahl J., Lundblad M., Karlton E. Predicting the spatial distribution of soil organic carbon stock in Swedish forests using a group of covariates and site-specific data. *Soil*. 2021;7(2):377–398. <https://doi.org/10.5194/soil-7-377-2021>
16. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. *Geoderma Regional*. 2021;27(2):e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2021.e00427>
17. Kortelainen P., Rantakari M., Huttunen J.T., Mattsson T., Alm J., Juutinen S., Larmola T., Silvola J., Martikainen P.J. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO<sub>2</sub> evasion from small boreal lakes. *Global Change Biology*. 2006;12(8):1554–1567. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01167.x>
18. Lim, A.G., Loiko, S.V., Kritskov, I.V., Kuzmina, D.M. Structural and functional features of landscapes with active thermokarst in the northern taiga of Western Siberia. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2017;(4):414–423. (In Russ.). [https://doi.org/10.15421/2017\\_136](https://doi.org/10.15421/2017_136)
19. Sabylina A.V. Organic carbon, total phosphorus and total nitrogen inflow to lake Onego with stream runoff, and their removal by Svir river waters in 1965–2008. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2016;(9):68–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/lim307>
20. Golovatskaya E.A., Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. Greenhouse Gas Fluxes and Carbon Sequestration in the Oligotrophic Peat Soils of Southern Taiga in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2024;57(2):210–219. <https://doi.org/10.1134/s1064229323602871>
21. Leonova O.A., Volkova E.M. Carbon reserves in peat deposits of watershed mires in the northeast of the Middle-Russian Upland. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2023;(8):20–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eco1845>
22. State Standard 31958-2012. Water. Methods for determining the content of total and dissolved organic carbon (Introduced 2012.12.12. Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1907-st) [internet]. Available at: <https://base.garant.ru/71231976/> (accessed 25 March 2026). (In Russ.).
23. Sanitary Regulations and Norms 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans [internet]. Available at: [https://base.garant.ru/400274954/#block\\_1000](https://base.garant.ru/400274954/#block_1000) (accessed 25 March 2025). (In Russ.).
24. Methodological guidelines for conducting research on test areas of the intensive monitoring network for assessing carbon reserves in forest ecosystems: geobotanical research, sampling of soil samples, and sampling of plant samples. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2024. (In Russ.).
25. Methodological guidelines for conducting research on sample plots of the intensive-level monitoring network for assessing carbon stocks in bog ecosystems: geobotanical studies, soil sampling, plant sampling. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». MIP SG. Khanty-Mansiysk; 2024. (In Russ.).
26. Methodological guidelines for assessing the input of dissolved organic carbon with atmospheric deposition. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». MIP SG. Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2024. (In Russ.).

27. Methodological guidelines for sample preparation and conducting physicochemical analysis of soil and plant samples. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». MIP SG. Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2024. (In Russ.).
28. Methodological guidelines for conducting chemical analysis of natural waters. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». MIP SG. Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2024. (In Russ.).
29. Forest monitoring methodology under the international ICP Forests programme. Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2008. (In Russ.).
30. State Standard 26423-85. Soils. Methods for determining specific electrical conductivity, pH, and residue of water extract [internet]. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294828/4294828015.pdf> (accessed 23 March 2025). (In Russ.).
31. Skogheim O.K. Rapport fra Arungenprosjektet. Ås-NLH-Report No. 2. Oslo: Norges landbrukshøgskole (NLH); 1979. (In Norway).
32. Sandimirov S.S., Kudryavtseva L.P., Dauval'ter V.A., Denisov D.B., Kosova A.L., Cherepanov A.A. Methods of ecological research of Arctic water bodies. Murmansk: MSTU Publishing; 2019. (In Russ.).
33. Sukhareva T.A., Ivanova E.A., Ershov V.V., Zenkova I.V., Korneykova, M.A., Shtabrovskaya I.M., Soshina A.S. Carbon and nitrogen content and reserves in terrestrial ecosystems of the Murmansk region. *Forest Science Issues*. 2023;6(2):125. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202362-125>
34. Zhivov D.A., Sukhareva, T.A. Nitrogen and carbon reserves in the soils of spruce forests of the Murmansk region. *Bulletin of Novosibirsk State Water Transport University*. 2025;(4):84–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>
35. Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. Organic matter of soils of the Russian Federation. Moscow: Nauka Publ.; 1996. (In Russ.).
36. Bobkova K.S., Galenko E.P. (eds.). Native spruce forests of the North: biodiversity, structure, functions. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2006. (In Russ.).
37. Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Tebenkova D., Knyazeva S., Bakhmet O., Kryshen A., Shashkov M. Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia. *Forests*. 2020;11(9):979. <https://doi.org/10.3390/f11090979>
38. Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*. 2014;5(1):81–91. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.77>
39. Dymov A.A. Soil successions in boreal forests of the Komi Republic. Moscow: GEOS Publ.; 2020. (In Russ.).
40. Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Assessment of organic carbon stocks in forest soils at the regional scale. *Eurasian Soil Science*. 2020;53(3):339–348. <https://doi.org/10.1134/s1064229320030023>
41. Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L., Dobrovolskaya V.A., Kondrashkina M.I., Dyad'kina S.E., Filippova O.I., Krotov D.G., Morozova T.M., Krasil'nikov P.V. Investigation of Uncertainty in Organic Carbon Stock Estimates on a Field Scale. 2023;56(11):1765–1775. <https://doi.org/10.1134/s106422932360183x>
42. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. (In Russ.).
43. Cherkinskii A.E., Chichagova O.A. Types of soil organoprofiles worldwide. In: *Global soil geography and soil-forming factors*. Collection of articles. Moscow; 1991, pp. 164–195. (In Russ.).
44. Pereverzev V.N. Soil formation on loose and crystalline rocks in Northern Fennoscandia. Apatity: Publishing House of the Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences; 2013. (In Russ.).
45. Denfeld B., Lupon A., Sponseller R., Laudon H., Karlsson J. Heterogeneous CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> patterns across space and time in a small boreal lake. *Inland Waters*. 2020;10(3):348–359. <https://doi.org/10.1080/20442041.2020.1787765>

46. Paerl H.W., Otten T.G. Blooms bite the hand that feeds them. *Science*. 2013;342(6157):433–434. <http://doi.org/10.1126/science.1245276>
47. Chupakova A.A., Chupakov A.V., Neverova N.V., Prasolov S.D., Zabelina S.A. Dissolved organic and inorganic carbon in different types of lakes in the boreal zone. *Regional Environmental Issues*. 2023;(6):49–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-6-49-55>
48. Belkina N.A. Patterns of sedimentation and early diagenesis of bottom sediments in water bodies of the southeastern part of the Fennoscandian Shield [dissertation]. St. Petersburg; 2021. (In Russ.).
49. Sukhareva T.A., Ershov V.V. Carbon stocks in soils of northern taiga forests of the Murmansk region under regional background conditions and in the presence of aerotechnogenic pollution. Certificate of Database Registration RU 2024624518. Published 17.10.2024. (In Russ.).
50. Sukhareva T.A., Ivanova E.A., Ryabov N.S., Ershov V.V., Zhivov D.A. Carbon and nitrogen stocks and content in the phytomass of spruce forests in geochemically coupled landscapes (Murmansk region). Certificate of Database Registration RU 2025623969. Published 23.09.2025. (In Russ.).

## Сведения об авторах

**Сухарева Татьяна Алексеевна** — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией наземных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН.  
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.  
Scopus ID: 55918629900  
Researcher ID: J-1100-2018  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6451-3495>  
SPIN-код: 3302-1130  
Тел.: +7 (815) 557-97-79  
E-mail: [t.sukhareva@ksc.ru](mailto:t.sukhareva@ksc.ru)

**Денисов Дмитрий Борисович** — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории водных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН.  
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.  
Scopus ID: 23011268200  
Research ID: Q-3762-2018  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5403-5661>  
SPIN-код: 7215-3063  
Тел.: +7 (921) 286-83-24  
E-mail: [proffessuir@gmail.com](mailto:proffessuir@gmail.com)

**Живов Дмитрий Андреевич** — ведущий инженер лаборатории наземных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН.  
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.  
Researcher ID: KMY-5329-2024  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4670-0144>  
SPIN-код: 7864-3354  
Тел.: +7 (815) 557-97-79  
E-mail: [d.zhivov@ksc.ru](mailto:d.zhivov@ksc.ru)

## Information about the authors

**Tatyana A. Sukhareva** — Cand. Sci (Biology), Head of Laboratory of Terrestrial Ecosystems, Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.  
Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.  
Scopus ID: 55918629900  
Researcher ID: J-1100-2018  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6451-3495>  
SPIN-code: 3302-1130  
Tel.: +7 (815) 557-97-79  
E-mail: [t.sukhareva@ksc.ru](mailto:t.sukhareva@ksc.ru)

**Dmitrii B. Denisov** — Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Aquatic Ecosystems, Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.  
Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.  
Scopus ID: 23011268200  
Research ID: Q-3762-2018  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5403-5661>  
SPIN-code: 7215-3063  
Tel.: +7 (921) 286-83-24  
E-mail: [proffessuir@gmail.com](mailto:proffessuir@gmail.com)

**Dmitry A. Zhivov** — Leading Engineer. Laboratory of Terrestrial Ecosystems, Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.  
Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.  
Researcher ID: KMY-5329-2024  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4670-0144>  
SPIN-code: 7864-3354  
Tel.: +7 (815) 557-97-79  
E-mail: [d.zhivov@ksc.ru](mailto:d.zhivov@ksc.ru)

**Слуковский Захар Иванович** — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией геоэкологии и рационального природопользования Арктики, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН. Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.  
Scopus ID: 56728798800  
Research ID N-1221-2016  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4238-1617>  
SPIN-код: 6763-8074  
Тел.: +7 (950) 893-39-63  
E-mail: [slukovsky87@gmail.com](mailto:slukovsky87@gmail.com)

**Курбатов Евгений Александрович** — директор Департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания». Россия, 184507, Мурманская область, г. Мончегорск, территория Промплощадка КГМК.  
Тел.: +7 (815) 366-22-52  
E-mail: [KurbatovEA@kolagmk.ru](mailto:KurbatovEA@kolagmk.ru)

**Фадеев Антон Михайлович** — начальник управления сопровождения надзорной деятельности и аудита Департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания». Россия, 184507, Мурманская область, г. Мончегорск, территория Промплощадка КГМК.  
Тел.: +7 (815) 367-79-98  
E-mail: [FadееvAM@kolagmk.ru](mailto:FadееvAM@kolagmk.ru)

**Бортник Анжелика Сергеевна** — главный специалист управления сопровождения надзорной деятельности и аудита Департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания». Россия, 184507, Мурманская область, г. Мончегорск, территория Промплощадка КГМК.  
Тел.: +7 (815) 366-50-54  
E-mail: [BortnikAS@kolagmk.ru](mailto:BortnikAS@kolagmk.ru)

**Zakhar I. Slukovskii** — Cand. Sci. (Biology), Head of Laboratory of Geoecology and Rational Nature Management of the Arctic, Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.  
Scopus ID: 56728798800  
Research ID N-1221-2016  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4238-1617>  
SPIN-code: 6763-8074  
Tel.: +7 (950) 893-39-63  
E-mail: [slukovsky87@gmail.com](mailto:slukovsky87@gmail.com)

**Evgeny A. Kurbatov** — Director, Department of Environmental Safety of the Kola Site JSC “Kola Mining and Metallurgical Company”. Russia, 184507, Murmansk region, Monchegorsk, territory of the KMK Industrial Site.  
Tel.: +7 (815) 366-22-52  
E-mail: [KurbatovEA@kolagmk.ru](mailto:KurbatovEA@kolagmk.ru)

**Anton M. Fadeev** — Head of Supervisory Activities and Audit Support Department Environmental Safety, Department of the Kola Site JSC “Kola Mining and Metallurgical Company”. Russia, 184507, Murmansk region, Monchegorsk, territory of the KMK Industrial Site  
Tel.: +7 (815) 367-79-98  
E-mail: [FadееvAM@kolagmk.ru](mailto:FadееvAM@kolagmk.ru)

**Anzhelika S. Bortnik** — Chief Specialist, Supervisory Activities and Audit Support, Department Environmental Safety Department of the Kola Site JSC “Kola Mining and Metallurgical Company”. Russia, 184507, Murmansk region, Monchegorsk, territory of the KMK Industrial Site.  
Tel.: +7 (815) 366-50-54  
E-mail: [BortnikAS@kolagmk.ru](mailto:BortnikAS@kolagmk.ru)

## Вклад авторов

**Сухарева Татьяна Алексеевна** — постановка задачи, обоснование актуальности, структурирование статьи, подготовка основной части текста статьи, формулирование выводов и рекомендаций.

**Денисов Дмитрий Борисович** — обоснование актуальности, оценка содержания углерода в воде, подготовка основной части текста статьи, формулирование выводов и рекомендаций.

**Живов Дмитрий Андреевич** — сбор и анализ данных, оценка запасов углерода в почвах, оформление статьи.

## Author contribution statement

**Tatyana A. Sukhareva** — conceptualization; justification of relevance; article structure; preparation of the main text; formulation of conclusions and recommendations.

**Dmitrii B. Denisov** — justification of relevance; assessment of carbon content in waters; preparation of the main text; formulation of conclusions and recommendations.

**Dmitry A. Zhivov** — data collection and analysis; assessment of soil carbon stocks; manuscript preparation.

**Zakhar I. Slukovskii** — data collection and analysis; assessment of carbon stocks in peat and bottom sediments.

**Слуковский Захар Иванович** — сбор и анализ данных, оценка запасов углерода в торфе и донных отложениях.

**Курбатов Евгений Александрович** — администрирование, существенный вклад в разработку концепции работы.

**Фадеев Антон Михайлович** — обоснование актуальности, анализ существующих методик.

**Бортник Анжелика Сергеевна** — сбор и анализ информации.

**Evgeny A. Kurbatov** — project administration; substantial contribution to conceptual development.

**Anton M. Fadeev** — justification of relevance; analysis of existing methodologies.

**Anzhelika S. Bortnik** — data collection and analysis.

## Финансирование

Исследование выполнено Институтом проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН в рамках Договоров с АО «Кольская ГМК» № КГМК/1934-2024 от 19.09.2024 и № КГМК/841-2025 от 15.07.2025 по теме: «Оценка способности наземных и водных экосистем к депонированию углерода в районе расположения АО «Кольская ГМК», Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6), тем государственных заданий ИППЭС КНЦ РАН (рег. № 125021402277-1, рег. № 125022102818-6, рег. № 124020100060-8).

## Funding

The study was conducted by the Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, under contracts with JSC «Kola MMC» No. KGMK/1934-2024 (19.09.2024) and No. KGMK/841-2025 (15.07.2025) within the project “Assessment of the carbon sequestration capacity of terrestrial and aquatic ecosystems in the vicinity of JSC Kola MMC”. The work also contributes to the national innovation project “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in Russia, and establishment of a national accounting system for climate-active substances and carbon budgets in forests and other terrestrial ecosystems” (Reg. No. 123030300031-6) and to INEP KSC RAS state-assignment projects (Reg. Nos. 125021402277-1, 125022102818-6, 124020100060-8).

## Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИППЭС КНЦ РАН за помощь в проведении полевых, камеральных и химико-аналитических исследований, а также инженеру лаборатории наземных экосистем И.М. Титовой за построение карт-схем расположения объектов исследования.

## Acknowledgements

The authors thank the staff of INEP KSC RAS for their assistance with fieldwork, laboratory processing, and chemical-analytical measurements, and engineer I.M. Titova of the Terrestrial Ecosystems Laboratory for preparing the site-location maps.