

ЗАПАСЫ АЗОТА И УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ЕЛОВЫХ ЛЕСОВ
МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

D.A. Zhivov, T.A. Sukhareva

NITROGEN AND CARBON RESERVES IN THE SOILS
OF SPRUCE FORESTS OF THE MURMANSK REGION

Аннотация. Лесные экосистемы играют важную роль в регулировании циклов углерода и азота, выступая природными резервуарами химических элементов. Настоящее исследование направлено на получение новых и уточнение уже существующих данных по запасам углерода и азота в почвах северотаёжных лесов. Эта информация особенно актуальна для отдельных регионов в связи с изменением климата и антропогенными воздействиями. Акцент на Мурманской области обусловлен недостаточной изученностью пулов углерода в почвах северных лесов, в которых особенности температурного и гидрологического режимов могут существенно повлиять на запасы органического вещества. В статье представлены результаты исследования запасов органического углерода (C_{org}) и азота (N) в почве еловых лесов Мурманской области. Объектом исследования послужили Al-Fe-гумусовые подзолы в ельниках кустарничково-зеленомошных в автоморфных позициях ландшафта. В июле–августе 2023 г. обследовано 5 пробных площадей, в пределах которых проведен отбор почвенных проб в доминирующих элементарных биогеоареалах: в межкروновых (кустарничково-зеленомошных) и подкروновых (под *Picea obovata* Ledeb. и *Betula pubescens* Ehrh.) пространствах. Показаны особенности профильного распределения запасов углерода и азота в органогенном (лесной подстилке) и минеральных горизонтах, а также накопление C_{org} и N в минеральных слоях 0–10, 0–30, 0–100 см. Под пологом ели выявлены наибольшие запасы углерода и азота в лесной подстилке. Общие запасы (органогенный горизонт + минеральный слой 0–100 см) углерода всех исследуемых биогеоареалов сопоставимы – 116,7–119,3 т/га. Запас C_{org} в подстилке составляет 13–22% от его общих запасов в почве. Запасы N в органогенном горизонте имеют сходные значения

Abstract. Forest ecosystems play an important role in regulating the carbon and nitrogen cycles, serving as natural reservoirs of chemical elements. This study aims to obtain new data and refine existing information on carbon and nitrogen stocks in the soils of northern taiga forests. This information is particularly relevant for certain regions due to climate change and anthropogenic impacts. The focus on the Murmansk Region is due to the insufficient knowledge of carbon pools in the soils of northern forests, where specific temperature and hydrological regimes can significantly affect organic matter stocks. The article presents the results of a study on organic carbon (C_{org}) and nitrogen (N) stocks in the soil of spruce forests in the Murmansk Region. The study object was Al-Fe-humus podzols in dwarf shrub-green moss spruce forests in automorphic landscape positions. In July–August 2023, five sample plots were surveyed. Within these plots, soil samples were collected in the dominant elementary biogeoregions: in inter-crown areas (dwarf shrub-green moss) and under-crown spaces (under *Picea obovata* Ledeb. and *Betula pubescens* Ehrh.). The study reveals the characteristics of the profile distribution of carbon and nitrogen stocks in the organogenic horizon (forest floor) and mineral horizons. It also demonstrates the accumulation of C_{org} and N in the mineral layers at depths of 0–10 cm, 0–30 cm, and 0–100 cm. The highest reserves of C_{org} and N in the forest litter were found under the spruce canopy. The total reserves (organogenic horizon + mineral layer 0–100 cm) of C_{org} in all studied biogeoregions are comparable and amount to 116,7–119,3 t/ha. The reserve of C_{org} in the litter is 13,3–21,8% of its total reserves in the soil. The reserves of N in the organogenic horizon are comparable for the under- and inter-canopy spaces and amount to 0,63–0,70

для подкроновых и межкroновых пространств – 0,63–0,70 т/га. Общие запасы N (16,4 т/га) и запасы N (15,9 т/га) в метровом слое почвы максимальны под кронами *Betula pubescens*. В межкroновых пространствах и под кронами *Picea obovata* общие запасы азота – 14,5–14,8 т/га. Запасы N в подстилке составляет 2,9–4,9% от его общих почвенных запасов. Таким образом, основные запасы почвенного азота (до 95%) и углерода (до 82%) залегают ниже органогенного горизонта и приходится на минеральный слой 0–100 см.

Ключевые слова: почва; северотаежные ельники; углерод; азот; автоморфные ландшафты; Мурманская область.

Сведения об авторах: Живов Дмитрий Андреевич, ORCID: 0009-0002-4670-0144, ведущий инженер; Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия, d.zhivov@ksc.ru; Сухарева Татьяна Алексеевна, ORCID: 0000-0001-6451-3495, заведующий лабораторией, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия, t.sukhareva@ksc.ru.

t/ha. The total N reserves (16,4 t/ha) and N reserves (15,9 t/ha) in the 1-meter soil layer are maximum under the *Betula pubescens* crowns. In the inter-crown spaces and under the *Picea obovata* crowns, the total nitrogen reserves are 14,5–14,8 t/ha. The N reserves in the litter are 2,9–4,9% of the total soil N reserves. Thus, the main reserves of soil nitrogen (up to 95%) and carbon (up to 82%) are located below the organogenic horizon and are found in the mineral layer of 0–100 cm.

Keywords: soil; North taiga spruce forests; carbon; nitrogen; automorphic landscapes; Murmansk region.

About the authors: Dmitry A. Zhivov, ORCID: 0009-0002-4670-0144, Senior Engineer; Institute of Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, d.zhivov@ksc.ru; Tatyana A. Sukhareva, ORCID: 0000-0001-6451-3495, Head of the Laboratory, Institute of Industrial Ecology of the North, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, t.sukhareva@ksc.ru.

Живов Д.А., Сухарева Т.А. Запасы азота и углерода в почвах еловых лесов Мурманской области // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 84-101. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>

Zhivov, D.A., & Sukhareva, T.A. (2025). Nitrogen and Carbon Reserves in the Soils of Spruce Forests of the Murmansk Region. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 84-101. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>

В настоящее время оценка содержания и запасов углерода в почвах лесных экосистем приобрела особую значимость в связи с изменением климата и антропогенным воздействием [6; 13; 17]. На территории России сосредоточено 22% мировых лесных ресурсов и более половины бореальных лесов планеты [10]. Несмотря на это, ранее они часто игнорировались в контексте международных усилий по смягчению последствий изменения климата, хотя служат значительным стоком углерода [14; 22; 32].

Данные по запасам углерода в почвах – важная составляющая баланса углерода в лесных экосистемах. На современном этапе накопилось большое количество работ по оценке глобальных и региональных запасов органического углерода в почвах [6; 13; 36, 39 и др.]. По некоторым данным, лесные экосистемы Земли содержат более 70% глобального пула почвенного углерода [29]. Основным источником углерода почв является растительный опад, качество которого (содержание элементов питания, величина соотношения C:N) определяет скорость его разложения почвенной биотой и, соответственно, скорость и объемы перехода углерода в почвенные пулы [7; 25; 31]. При анализе углеродного баланса основное внимание уделяется наземной растительности, а не

почвенному компоненту [5; 26], поэтому существуют неопределенности в оценке запасов углерода в почвах, в том числе северотаёжных лесов.

Кроме того, недостаточно актуальных сведений о пространственном распределении и почвенных пулов углерода в почвах бореальных лесов, которые вносят весомый вклад в глобальный цикл углерода [22; 34], являясь значительным резервуаром органического вещества. Лесные почвы бореального пояса содержат 15 % мировых запасов почвенного углерода [35; 37]. Потепление климата может привести к интенсификации процессов разложения органических остатков в бореальных лесах и, соответственно, к увеличению поступления CO₂ из почвы в атмосферу. Запасы азота находятся в тесной зависимости от запасов углерода, т.к. почти весь азот в почве находится в составе органического вещества.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки роли северных экосистем в углеродном балансе, а также потребностью в данных для прогнозирования и снижения негативных эффектов углеродсодержащих газов [34] в условиях современных климатических изменений.

Полученные результаты помогут в восполнении дефицита актуальных количественных данных по запасам углерода и азота в почвах северотаёжных лесов и станут основой для региональных оценок углеродного баланса и мониторинга в условиях меняющегося климата. В дальнейшем, материалы могут быть интегрированы в национальные программы учёта системы выбросов и поглощения парниковых газов, при проектировании природоохранных мероприятий и карбоновых проектов. Полученные результаты позволят расширить представления о функционировании северных экосистем и их роли в биогеохимических циклах, а также будут полезны для разработки стратегий сохранения и рационального использования природных ресурсов Европейского Севера РФ.

Цель работы – оценка запасов углерода и азота в подзолах иллювиально-гумусовых ненарушенных (фоновых) ельников кустарничково-зеленомошных Мурманской области в автоморфных позициях ландшафта.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в июле-августе 2023 г. в ельниках кустарничково-зеленомошных, расположенных на юго-западе Мурманской области (Кандалакшский район, окрестности с. Алакуртти) (рис. 1). Заложено 5 пробных площадей в автоморфных позициях ландшафта, которые расположены на небольшой гряде, вытянутой с юга на север с незначительным понижением рельефа к северу, 295–330 м над ур. м.

Почвы на пробных площадях формируются на супесчаной морене и представлены Al-Fe-гумусовыми подзолами [4] с типичным для них профилем: O-E-BHF-C, или Carbic Podzols (Arenic), согласно классификации WRB 2022 [40]. Древостой представлен в основном елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и берёзой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), разновозрастной, V класса бонитета. Господствующими жизненными формами напочвенного покрова являлись кустарнички (*Vaccinium myrtillus* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Empetrum hermaphroditum* Hager.) и мхи (*Pleurozium schreberi* Brid., *Hylocomium splendens* Hedw.). Из лишайников небольшими пятнами произрастают представители рода *Cladonia*. Общее проективное покрытие растительностью – 90–95%.



Рис. 1. Карта расположения пробных площадей.

Примечание: пробные площади имеют следующие координаты:

ПП № 1: 66,952220 с.ш. 29,862220 в.д; ПП № 2: 66,952780 с.ш. 29,863060 в.д;

ПП № 3: 66,953890 с.ш. 29,846440 в.д; ПП № 4: 66,947780 с.ш. 29,860000 в.д;

ПП № 5: 66,948610 с.ш. 29,861670 в.д.

Исследования проводили с учётом внутрибиогеоценотического варьирования. На каждой пробной площади почвенные пробы отбирали в 3-кратной повторности в доминирующих элементарных биогеоареалах (ЭБГА): еловом кустарничково-зеленомошном (проективное покрытие 20–40%), березовом кустарничково-зеленомошном (20–25%), кустарничково-зеленомошном (20–35%). Пробы отбирали по генетическим горизонтам: органогенный горизонт (О), элювиальный (гор. Е), иллювиальный (гор. ВНГ) и почвообразующая порода (гор. С) Для определения запаса подстилки у каждого почвенного разреза отбирали почвенный монолит рамкой 25х25 см² на всю глубину органогенного горизонта, измеряли мощность. В лабораторных условиях проводили ручной разбор почвенных монолитов на подгоризонты OL, OF и OH, при этом корни растений извлекали. Подгоризонт опада (OL) представляет собой верхний слой, состоящий из свежих или слаборазложившихся растительных остатков, таких как листья, хвоя, кора, ветки, опад напочвенного покрова. Подгоризонт ферментации (OF) состоит из полуразложившихся растительных остатков, в которых еще сохраняются признаки анатомического строения. Подгоризонт гумификации (OH) состоит в основном из полностью разложившегося, гумифицированного органического вещества и имеет более плотную и темную однородную структуру [12]. Определяли абсолютно сухую массу каждого подгоризонта подстилки. Образцы на плотность минеральных горизонтов почвы отбирали почвенным буром диаметром 5,5 см для каждого разреза. Определение плотности сложения почвы проводили по методу Н.А. Качинского.

Полевые и камеральные работы по исследованию почв выполнены согласно методическим рекомендациям, разработанных участниками научно-образовательного консорциума «Углерод в экосистемах: мониторинг» в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ).

Содержание углерода и азота в пробах определяли методом прямого сжигания на элементном анализаторе CHNS EMA 502 (VELP, Италия).

Для определения запасов органического углерода ($C_{\text{орг.}}$) использовали данные по мощности, плотности почвенных горизонтов и содержанию в них углерода. Расчет запаса углерода в лесной подстилке проводили путем умножения абсолютно сухой массы почвы на содержание углерода. Расчет запасов $C_{\text{орг.}}$ в минеральной толще почвы выполняли по формуле (1) [6]:

$$C_{\text{запас}} = C_{\text{орг.}} \times \rho \times h \times 0,01, \quad (1)$$

где $C_{\text{запас}}$ – запас углерода в почве, тС/га; $C_{\text{орг.}}$ – содержание органического углерода в почве, %; ρ – плотность почвы, г/см³; h – толщина расчётного слоя почвы, см; 0,01 – коэффициент перевода единиц (учитывает: % → доля, г/см³ → т/га при h в см).

Аналогично определили запасы азота в почве.

Расчеты запасов проводили для фиксированных минеральных слоев 0–10, 0–30 и 0–100 см с учетом доли мелкозема. Полученные данные обрабатывали в программных пакетах MS Excel (описательная статистика) и Statistica 13.3 (U-критерий Манна-Уитни).

Результаты и обсуждение

Средняя мощность органогенного горизонта (О) в межкроновом пространстве составила $8,7 \pm 2,3$ см, под кроной ели – $9,0 \pm 2,9$ см, под кроной берёзы – $9,3 \pm 1,6$ см. В работе Е.М. Лаптевой и др. [8] есть предположение, что практически все почвы, формирующиеся в автоморфных позициях ландшафтов Приполярного Урала, вне зависимости от характера растительного покрова, обладают близкими значениями мощности органогенных горизонтов – 4–5 см. При этом, мощность органогенного горизонта в автоморфных позициях ландшафта на наших объектах исследования также не зависела от элементарного биогеоареала и в среднем составляла 8–9 см. Полученные нами данные по мощности подстилки сходны с результатами, полученными для подзолов Мурманской области [9; 15], Республики Коми [1; 2; 6; 18], Республики Карелия [19].

При оценках почвенных пулов углерода и азота исследователи отмечают нехватку данных по плотности почв [16], что вносит ряд сложностей в расчёты запасов элементов. Нами установлено, что почва межкроновых пространств является более плотной. Плотность подзолистого горизонта (Е) составляет $1,32 \pm 0,24$ г/см³; иллювиального горизонта (ВНФ) – $1,22 \pm 0,35$ г/см³; подгоризонта ВС – $1,30 \pm 0,12$ г/см³. В подкроновых пространствах почва менее плотная. Под пологом ели плотность горизонта Е – $1,13 \pm 0,09$ г/см³; горизонта ВНФ – $0,94 \pm 0,15$ г/см³, под пологом берёзы $1,02 \pm 0,20$ и $1,12 \pm 0,22$ г/см³ соответственно. Различия в плотности межкроновых и подкроновых пространств обусловлены разницей в фитомассе корневых систем, которая под кроной деревьев выше. Доля мелкозёма (<2мм) в почвах изменялась в диапазоне от 92,8 до 100%.

Особенности распределения запасов азота и углерода в органогенных и минеральных горизонтах представлены на рисунке 2.

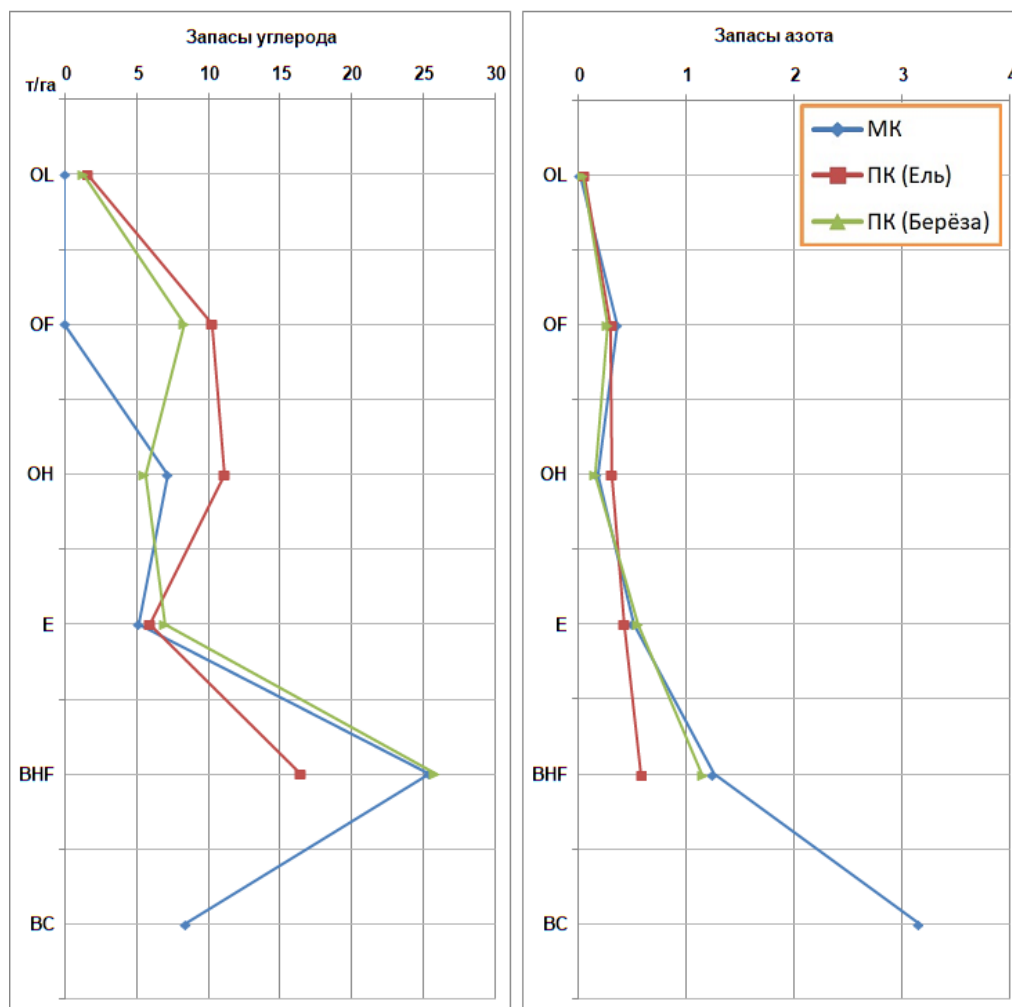


Рис. 2. Распределение запасов углерода азота по генетическим горизонтам почв в автоморфных ельниках кустарничково-зеленомошных Мурманской области, т/га.
Примечание: МК – межкروновые пространства, n=5, ПК (ель) – подкروновые еловые пространства, n=5, ПК (берёза) – подкروновые берёзовые пространства, n=5

В автоморфных ландшафтах запасы углерода в органогенном горизонте (О) варьируют от 14 до 34 т С/га. В подгоризонтах подстилки запасы варьировали от 0,21 до 2,23 т С/га (гор. OL), от 3,48 до 21,57 т С/га (гор. OF), в (гор. OH) – от 2,14 до 20,30 т С/га. В минеральных горизонтах – от 2 до 12 т С/га (гор. E) и от 10 до 39 т С/га (гор. BHF), в подгоризонте (гор. BC) – от 5 до 13 т С/га. В подстилке меж- и подкроновых пространствах запасы углерода в подгоризонте OL ниже, чем в подгоризонтах OF и OH, что объясняется более интенсивным поступлением растительного опада под кронами деревьев. При этом наибольшие запасы углерода ($p \leq 0,05$) в подстилке отмечены под кроной *Picea obovata*. Максимальные запасы углерода ($p \leq 0,05$) отмечены в иллювиальном горизонте BHF почв.

Запасы азота в органогенном горизонте (О) варьируют от 0,34 до 0,90 т С/га. В подгоризонтах подстилки варьировали незначительно – от 0,01 до 0,08 т N/га (гор. OL), от 0,13 до 0,48 т N/га (гор. OF), в (гор. OH) – от 0,08 до 0,57 т N/га. В минеральных горизонтах – от 0,23 до 0,74 т N/га (гор. E) и от 0,24 до 2,01 т N/га (гор. BHF), в подгоризонте (гор. BC) – от 0,72 до 7,99 т N/га. Наиболее высокое содержание N отмечено в подгоризонте BC.

Запасы азота (N) в подстилке и минеральных слоях (0–10, 0–30 и 0–100 см) представлены на рисунке 3. Запасы N в органогенном горизонте варьировали под кроной ели от 0,6 до 0,9, под кроной березы – от 0,3 до 0,5, между крон – от 0,5 до 0,7 т/га. Рассчитанные средние значения запасов N в подстилке сопоставимы для подкروновых и междкроновых пространствах (рис. 3). Запасы N в минеральном слое 0–100 см под кроной ели изменялись в диапазоне от 7,3 до 20,3, под кроной березы – от 13,2 до 20,1, между крон – от 8,4 до 19,1 т/га. Максимальные запасы N ($p \leq 0,05$) в метровом слое почвы отмечены под кроной берёзы ($15,9 \pm 2,9$ т/га). Запасы азота в минеральном слое 0–100 см в междкроновом и подкроновом еловом пространстве характеризуются более низкими значениями (14–14,1 т/га). В слое 0–10 см содержится 0,43–0,97 т/га, в слое 0–30 см – около четверти запаса от метрового слоя (1,85–4,52 т/га).

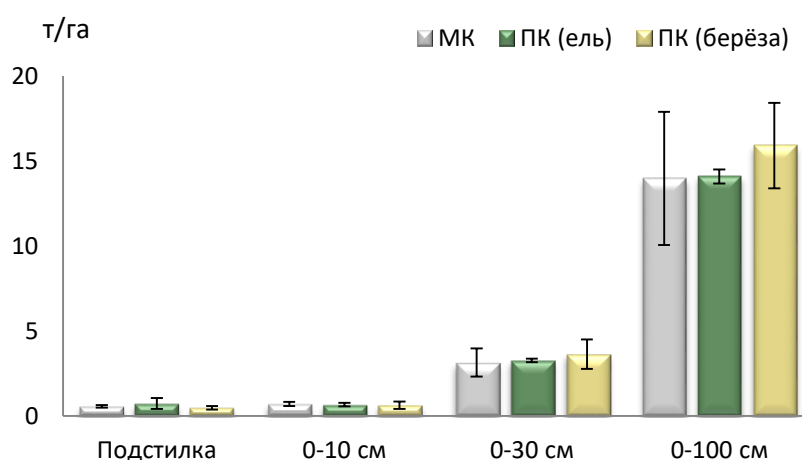


Рис. 3. Запасы азота в органогенном горизонте почвы и минеральных слоях (0–10, 0–30 и 0–100 см) в автоморфных ельниках кустарничково-зеленомошных Мурманской области, т/га. Примечание: приведены средние значения и стандартное отклонение. МК – междкроновые пространства, $n=5$, ПК (ель) – подкроновые еловые пространства, $n=5$, ПК (берёза) – подкроновые берёзовые пространства, $n=5$

Общие запасы N (подстилка + минеральный слой 0–100 см) также выше под кроной березы – 16,4 т/га. В подкроновом еловом пространстве общие запасы N составляют $14,8 \pm 4,5$ т/га, между кронами – $14,5 \pm 4,0$ т/га.

Запас N в подстилке составляет 2,9–4,9% от его общих почвенных запасов. Таким образом, основные запасы залегают ниже органогенного горизонта, зоны активной деятельности корней.

Запасы углерода ($C_{орг.}$) в подстилке и минеральных слоях 0–10, 0–30 и 0–100 см представлены на рис. 4. Запасы $C_{орг.}$ в органогенном горизонте варьировали под кроной ели от 19,8 до 33,9, под кроной березы – от 14,4 до 18,2, между крон – от 14,3 до 23,8 т/га. Запасы $C_{орг.}$ в минеральном слое 0–100 см под кроной ели изменялись в диапазоне от 67,19 до 135,2, под кроной березы – от 81,2 до 135,7, между крон – от 58,8 до 131,2 т/га. Рассчитанные средние запасы $C_{орг.}$ в подстилке снижаются в ряду: под кроной ели (25,5 т/га) > между крон (21,2 т/га) > под кроной березы (15,8 т/га). Наибольшие запасы углерода ($p \leq 0,05$) в

подстилке и минеральном слое 0–10 см еловых пространств по сравнению с межкроновыми и подкroновыми березовыми пространствами могут объясняться более мощным пологом ели и большим количеством трудно разлагаемого опада хвои. В минеральном слое 0–100 см наблюдается обратная тенденция: максимальные запасы $C_{орг.}$ отмечены под подкroновом березовом пространстве (103,4 т/га), минимальные в межкroновом и подкroновом пространстве (91,7–95,5 т/га). В слое 0–10 см содержится 3,2–17,2 т/га, в слое 0–30 см – около трети запасов углерода от метрового слоя (25,1–47,8 т/га).

Общие запасы $C_{орг.}$ всех исследуемых биогеоареалов сопоставимы и составляют 116,7–119,3 т/га.

Запас $C_{орг.}$ в подстилке составляет 13,3–21,8% от его общих запасов в почве (рис. 3). Основные запасы углерода (до 82%) приходятся на метровый слой почвы. Полученные результаты согласуются с данными, полученными для дерново-подзолистых почв лесной зоны европейской территории России (в т. ч. территория «Чашниково», расположенная в Солнечногорском районе Московской области) в полугидроморфных и автоморфных условиях [20].

Высокий уровень вариабельности запасов N и $C_{орг.}$ (рис. 3 и 4) связан с небольшим объемом выборки ($n=5$) и значительной пространственной неоднородностью в пределах отдельной пробной площади.

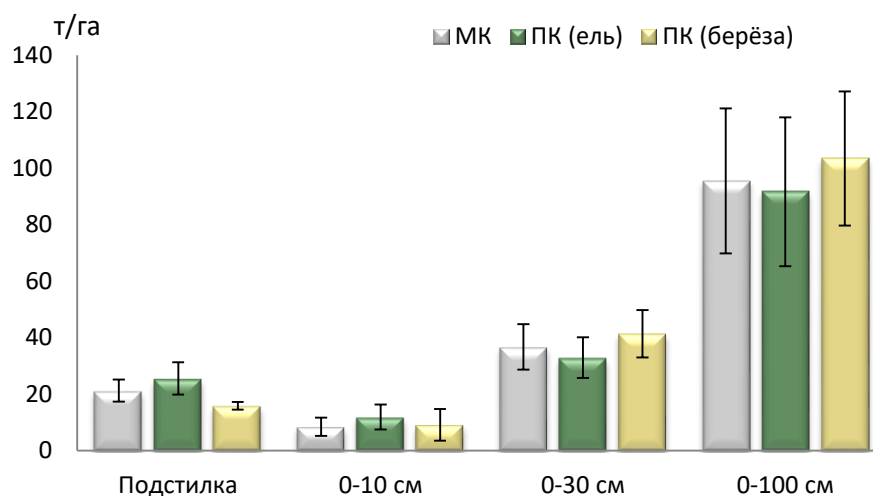


Рис. 4. Запасы углерода в органогенном горизонте почвы и минеральных слоях (0–10, 0–30 и 0–100 см) в автоморфных ельниках кустарничково-зеленомошных Мурманской области, т/га.

Примечание: МК – межкroновые пространства, $n=5$, ПК (ель) – подкroновые еловые пространства, $n=5$, ПК (берёза) – подкroновые березовые пространства, $n=5$

Вопрос о роли подстилки в депонировании органического углерода вызывает научные дискуссии, что обусловлено комплексным характером данного процесса. Некоторые исследователи [21] указывают на относительно невысокий вклад подстилки в общий пул углерода (5–6%), что может казаться недостаточным для признания её существенного влияния на углеродный баланс экосистемы.

Однако такой подход требует более глубокого анализа. При детальном сравнительном рассмотрении становится очевидным, что оценка роли подстилки должна учитывать не только абсолютные значения содержания $C_{орг.}$, но и дополнительные факторы регионально-климатического характера, такие как: климатическая зональность (в условиях Севера процессы разложения органического вещества существенно замедлены, что способствует аккумуляции углерода в верхних горизонтах), особенности почвообразования (в северных экосистемах органогенный горизонт формируется специфическим образом, создавая особые условия для консервации углерода), скорость деструкции (низкая температура и короткий вегетационный период приводят к замедлению минерализации органического вещества, что усиливает роль подстилки как временного депо углерода), структура экосистемы (в бореальных и субарктических ландшафтах подстилка является важным компонентом, влияющим на формирование всего почвенного профиля).

Исследования [1-3; 6; 8; 11; 14; 21] демонстрируют, что в почвах северных территорий именно органогенный горизонт выступает ключевым аккумулятором углерода, что обусловлено совокупностью вышеперечисленных факторов. Таким образом, исключение подстилки из оценки углероддепонирующей способности почв может привести к существенному искажению общей картины углеродного баланса экосистемы.

Следовательно, несмотря на относительно невысокие процентные показатели, вклад подстилки в общий пул углерода нельзя недооценивать, особенно в условиях северных экосистем, где она выполняет уникальные функции в системе углеродного цикла.

Анализ литературных данных показывает варьирование запасов углерода в почвах на покрытых лесом землях РФ (табл. 1) и в отдельных регионах страны (табл. 2). [1; 2; 6; 13; 14; 21]

Таблица 1

**Запасы углерода в почвах покрытых лесом земель
в России по оценкам различных исследователей, т/га.**

Запасы $C_{орг.}$ т/га		Автор/год
Подстилка	Слой 0–100 см	
–	170	Орлов Д.С. и др., 1996
–	203	Rozhkov V.A. et al. 1996
18	96, (86)	Alexeyev B.H., Birdsey R., 1998, (1994)
15	115	Nilsson I. et al., 2000
–	148	Уткин А.И. и др., 2001
–	159	Швиденко А.З. и др., 2003
–	125	Исаев А. и др., 2004
–	137	Честных О.В., Замолотчиков Д.Г., Уткин А.И., 2004
–	253	Сонген Б. и др., 2005
–	159	Замолотчиков Д.Г. и др., 2005
–	115	Stolbovoi V., 2006
7,2	162	Честных О.В. и др., 2004; 2007
10,1	176	Щепашенко Д.Г. и др., 2013
9	136	Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., 2014

Примечание: * «–» – данные отсутствуют.

Таблица 2

**Запасы органического углерода в почвах северных регионов РФ
по оценкам различных исследователей, т/га**

Регион	Запасы С _{орг.} т/га		Почвы	Автор/год
	Подстилка	Слой 0-100 см		
Мурманская область (северная тайга)	16–21	92–103	Альфегумусовые подзолы	Собственные данные
Республика Карелия (средняя тайга)	11–61	39–402	Подзолы, песчаные и супесчаные	Бахмет О.Н., 2018
Республика Коми (северная тайга)	5	29–68	Подзол иллювиально- железистый	Дымов А.А., 2020
	12–27	88–101	Подзолистые почвы, торфянисто- подзолисто-глеевые	Бобкова К.С. и Галенко Э.Л., 2006
Республика Коми (средняя тайга)	16–35	57–141	Подзолистые почвы, торфянисто- подзолисто-глеевые	Бобкова К.С. и Галенко Э.Л., 2006
	14–16	79–169	Типичные подзолы	Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В., 2014
	29	141–161	Глееподзолы- Иллювиально- гумусово- железистые	
	30	51	Альфегумусовые подзолы	Пастухов А.В., Каверин Д.А., 2013
Приполярный Урал	21 (±14)	106 (±42)	Подзолы	Лаптева Е.М. и др., 2022

Наши исследования показывают, что содержание углерода в почвах северотаежных лесов Мурманской области, как правило, ниже, чем в целом в почвах на покрытых лесом землях в РФ.

В Мурманской области запасы углерода в лесной подстилке и минеральном слое 0-100 см в еловых лесах в автоморфных ландшафтах соответствуют значениям, полученными другими исследователями для северной и средней подзон тайги в Республике Коми и Республике Карелия (табл. 1).

Известно, что тип почвы влияет на запасы углерода в почвенном профиле [14] и является фактором, определяющим эти запасы [14; 23; 24; 33]. По этой причине потребность в исследовании складывается не только в отношении регионального аспекта, но и всех приуроченных к нему типов почв со всеми изменениями ландшафтов. Ключевыми факторами является также интенсивность биогеохимических циклов и степень антропогенного воздействия на экосистемы. Полученные данные согласуются с глобальными трендами распределения почвенного углерода в бореальной зоне, что подтверждается современными климатическими моделями и исследованиями углеродного баланса северных территорий [28; 38]. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение влияния климатических изменений на динамику

почвенного углерода с учетом специфики региональных почвенных процессов и ландшафтно-климатических условий.

Выводы

1. В ненарушенных ельниках кустарничково-зеленомошных Мурманской области в автоморфных позициях ландшафта мощность органогенного горизонта составляла 8–9 см и не зависела от элементарного биогеоареала (подкроновые и межкроновые пространства).

2. Запасы $C_{\text{орг.}}$ в подстилке еловых лесов снижались в ряду: под кронами ели ($25,5 \pm 5,7$ т/га) > между кронами ($21,2 \pm 3,9$ т/га) > под кронами березы ($15,8 \pm 1,4$ т/га). Наибольшие запасы $C_{\text{орг.}}$ в подстилке еловых пространств по сравнению с межкроновыми и подкроновыми березовыми пространствами могут объясняться более мощным пологом ели и большим количеством опавшей хвои. Запасы N в подстилке были сопоставимы для подкроновых и межкроновых пространств.

3. Анализ распределения запасов углерода по генетическим горизонтам показал, что его основные запасы сосредоточены в органогенном (O) и иллювиальном (BHF) горизонтах. Максимальные запасы в почвенных горизонтах выявлены под кроной *Picea obovata*, что связано с интенсивным поступлением и медленным разложением хвойного опада. В подстилке наибольший вклад в запасы углерода вносят подгоризонты OF и OH, тогда как в минеральных горизонтах доминирующим пулом углерода является горизонт BHF.

4. Профильное распределение запасов азота по почвенным горизонтам свидетельствует о его низких запасах в органогенном и иллювиальном горизонтах, и высоких – в иллювиальном (BHF) горизонте и в подгоризонте (BC), что может указывать на значительный потенциал к депонированию углерода не только в почве корнеобитаемой зоны, но и в минеральных горизонтах.

5. Основные запасы почвенного N (до 96%) и $C_{\text{орг.}}$ (до 82%) залегают ниже органогенного горизонта и приходятся на минеральный слой 0–100 см. Под кронами берёз выявлены максимальные запасы $C_{\text{орг.}}$ ($103,4 \pm 23,8$ т/га) и N ($15,9 \pm 2,9$) в метровом слое почвы.

6. Подстилка северотаежных лесов содержит весомую часть запасов $C_{\text{орг.}}$ – 13,3–21,8% от общего пула углерода, поэтому её нельзя игнорировать при оценке углероддепонирующей способности лесных почв.

Полученные данные подчёркивают важность учёта глубоких почвенных слоёв, пространственной неоднородности почвы, физико-климатических особенностей региона исследования и внутрибиогеоценотического разнообразия при оценке углеродно-азотного баланса северотаежных экосистем.

Работа выполнена в рамках реализации 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 бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» и в рамках государственного задания ИППЭС КНЦ РАН № 1023032200043-6.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра коллективного пользования физико-химических методов анализа ИППЭС КНЦ РАН за выполнение химико-аналитических работ, а также сотрудникам лаборатории наземных экосистем к.б.н. В.В. Ершову и инженеру Н.С. Рябову за помощь в проведении полевых работ. Авторы признательны также инженеру И.М. Штабровской за построение карты объектов исследования.

Литература

1. Бобкова К.С. Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаёжных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
2. Дымов, А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>.
3. Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар, 1975. 343 с.
4. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
5. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С., Смирнова И.Е. Оценка запасов углерода в почвах лесных экосистем как основа мониторинга климатически активных веществ // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1686-1702. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329>.
6. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. С.-Пб.: Наука, 2006. 354 с.
7. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенёкова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803-816. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086>.
8. Лаптева Е.М., Шахтарова О.В., Холопов Ю.В., Денева С.В. Оценка запасов органического углерода в почвах низкогорных ландшафтов Приполярного Урала // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Киров, 01 декабря 2022 года). Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 132-135. EDN CLFXBF.
9. Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 341 с.
10. Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е. и др. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. Москва: КМК, 2018. 232 с. EDN YSMMYH.
11. Малышева Н., Золина Т., Филипчук А. Запасы углерода в почвах по материалам государственной инвентаризации лесов // Известия вузов. Лесной журнал. 2025. Вып. 1, февраль. С. 83-97. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-83-97>.
12. 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. 114 с.
13. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М., 1996.
14. Осипов А.Ф., Старцев В.В., Прокушкин А.С., Дымов А.А. Запасы углерода в почвах лесов Красноярского края: анализ роли типа почвы и древесной породы // Теоретическая и прикладная экология. 2023. С. 67-74. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-1-067-074>.

15. Переверзев В.Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 231 с.
16. Рыжова И.М., Подвезенная М.А., Кириллова Н.П. Вариабельность запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах лесных экосистем Европейской территории России: сравнительный статистический анализ // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2022. № 2.
17. Структурно-функциональная роль почвы в биосфере / Отв.ред. Г.В. Добровольский. М.: Геос, 1999. 278 с.
18. Углерод в лесных и болотных экосистемах особо охраняемых природных территорий Республики Коми / Коми научный центр УрО РАН. Сыктывкар, 2014. 202 с.
19. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Медведева М.В., Ахметова Г.В., Новиков С.Г., Ткаченко Ю.Н., Солодовников А.Н. Тяжёлые металлы в почвах Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 222 с.
20. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340-350.
21. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>. EDN PNQXGL.
22. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // Global and Planetary Change. 2015. Vol. 128. P. 24-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>.
23. Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale // Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. P. 339-348. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030023>.
24. 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. Vol. 251-252. P. 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>.
25. Gleixner G. Soil Organic Matter Dynamics, a Biological Perspective Derived from the Use of Compound-Specific Isotopes Studies // Ecological Research. 2013. Vol. 28. P. 683-695. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-1022-9>.
26. Hartley I.P., Hill T.C., Chadburn C.E., Hugelius G. Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilisation capacities // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. P. 6713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41467-021-27101-1>.
27. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Sixth Assessment Report [Electronic resource] / IPCC. Electronic data. 2021. Access at: URL: <https://clck.ru/3QstcX> (accessed: 30.04.2025).
28. IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge and New York, NY: Cambridge University Press.
29. Jandl R., Lindner M., Vesterdal L. et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? // Geoderma. 2007. Vol. 137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>.
30. Lukina N.V., Geraskina A.P., Gornov A.V. et al. Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects // Forest science issues. 2021. Vol. 1. № 4. P. 1-60. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202141k-60>.
31. Lukina N.V., Orlova M.A., Steinnes E., Artemkina N.A., Gorbacheva T.T., Smirnov V.E., Belova E.A. Mass-loss rates from decomposition of plant residues in spruce forests near the northern tree

line subject to strong air pollution // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24. Iss. 24. P. 19874-19887. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9348-z>.

32. Moen J., Rist L., Bishop K. et al. Eye on the taiga: removing global policy impediments to safeguard the boreal forest // *Conservation Letters*. 2014. Vol. 7. Iss. 4. P. 408-418. <https://doi.org/10.1111/conl.12098>.

33. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // *Geoderma Regional*. 2021. Vol. 27. Article № e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00427>.

34. 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) // *An International Journal of Forest Research*. 2019. Vol. 92. P. 264-277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz004>.

35. Post W.M., Kwon K.C., Melillo J.M. et al. Soil carbon pools and world life zones // *Nature*. 1982. Vol. 298. P. 156-159.

36. 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. Vol. 5. № 1. P. 81-91. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.77>.

37. Schlesinger W.H. Carbon storage in soils of the northern taiga // *Canadian Journal of Forest Research*. 1977. Vol. 7. P. 21-29.

38. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., and Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. Vol. 23. GB 2023. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>.

39. Walker M.D., Wahren C.H., Hollister R.D., Henry G.H.R., Ahlquist L.E., Alatalo J.M., BretHarte M.S., Calef M.P., Callaghan T.V., Carroll A.B., Epstein H.E., Jonsdottir I.S., Klein J.A., Magnusson B., Molau U., Oberbauer S.F., Rewa S.P., Robinson C.H., Shaver G.R., Suding K.N., Thompson C.C., Tolvanen A., Totland O., Turner P.L., Tweedie C.E., Webber P.J., Wookey P.A. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome // *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2006. Vol. 103(5). P. 1342-1346. <https://doi.org/10.1073/pnas.0503198103>.

40. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences. (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200417>.

References

1. Bobkova, K.S. Mashika, A.V., & Smagin, A.V. (2014). *Dinamika sodержaniya ugleroda organicheskogo veshhestva v srednetayozhny`x el`nikax na avtomorfny`x pochvax*. SPb.: Nauka, 270 s. (in Russ.).

2. Dy`mov, A.A. (2020). *Sukcessii pochv v boreal`ny`x lesax Respubliki Komi*. M.: GEOS, 336 s. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>. (in Russ.).

3. Zaboeva, I.V. (1975). *Pochvy` i zemel`ny`e resursy` Komi ASSR*. Sy`kty`vkar, 343 s. (in Russ.).

4. *Klassifikaciya i diagnostika pochv Rossii*. (2004). Smolensk: Ojkumena, 342 s. (in Russ.).

5. Kopcik, G.N., Kopcik, S.V., Kupriyanova, Yu.V., Kadulin, M.S., & Smirnova, I.E. (2023). *Ocenka zapasov ugleroda v pochvax lesny`x e`kosistem kak osnova monitoringa klimaticheskii aktivny`x veshhestv*. *Pochvovedenie*, 12, 1686-1702. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329>. (in Russ.).

6. *Korenny`e elovy`e lesa Severa: bioraznoobrazie, struktura, funkcii*. (2006). S.-Pb.: Nauka, 354 s. (in Russ.).

7. Kuzneczova, A.I., Lukina, N.V., Tixonova, E.V., Gornov, A.V., Gornova, M.V., Smirnov, V.E., Geras`kina, A.P., Shevchenko, N.E., Teben`kova, D.N., & Chumachenko, S.I. (2019). Akkumulyaciya ugleroda v peschany`x i suglinisty`x pochvax ravninny`x xvojno-shirokolistvenny`x lesov v xode poslerubochny`x vosstanovitel`ny`x sukcesij. *Pochvovedenie*, 7, 803-816. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086>. (in Russ.).
8. Lapteva, E.M., Shaxtarova, O.V., Xolopov, Yu.V., & Deneva, S.V. Ocenka zapasov organicheskogo ugleroda v pochvax nizkogorny`x landshaftov Pripolyarnogo Urala. *Biodiagnostika sostoyaniya prirodnny`x i prirodno-texnogenny`x sistem: Materialy` XX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem* (Kirov, 01 dekabrya 2022 goda). Kirov: Vyatskij gosudarstvenny`j universitet, 2022. S. 132-135. EDN CLFXBF. (in Russ.).
9. Lukina, N.V., Polyanskaya, L.M., & Orlova, M.A. (2008). Pitatel`ny`j rezhim pochv severotaezhny`x lesov. M.: Nauka, 341 s. (in Russ.).
10. Lukina, N.V., Tixonova, E.V., & hevchenko, N.E. i dr. (2018). Akkumulyaciya ugleroda v lesny`x pochvax i sukcesionny`j status lesov. Moskva: KMK, 232 s. EDN YSMMYH. (in Russ.).
11. Maly`sheva, N., Zolina, T., & Filipchuk, A. (2025). Zapasy` ugleroda v pochvax po materialam gosudarstvennoj inventarizacii lesov. *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal*, 1, fevral`, 83-97. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-83-97>. (in Russ.).
12. Metodicheskie rekomendacii po provedeniyu issledovanij na probny`x ploshhadyax seti intensivnogo urovnya monitoringa dlya ocenki zapasov ugleroda v lesny`x e`kosistemax: geobotanicheskie issledovaniya, otbor pochvenny`x obrazczov, otbor rastitel`ny`x obrazczov. (2024). Vazhnejshij innovacionny`j proekt «Edinaya nacional`naya sistema monitoringa klimaticheskij aktivny`x veshhestv» (VIP GZ). Moskva: Cze`PL RAN, 114 s. (in Russ.).
13. Orlov, D.S., Biryukova, O.N., & Suxanova, N.I. (1996). Organicheskoe veshhestvo pochv Rossijskoj Federacii. M. (in Russ.).
14. Osipov, A.F., Starcev, V.V., Prokushkin, A.S., & Dy`mov, A.A. (2023). Zapasy` ugleroda v pochvax lesov Krasnoyarskogo kraja: analiz roli tipa pochvy` i drevesnoj porody`. *Teoreticheskaya i prikladnaya e`kologiya*. S. 67-74. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-1-067-074>. (in Russ.).
15. Pereverzev, V.N. (2004). Lesny`e pochvy` Kol`skogo poluostrova. M.: Nauka, 231 s. (in Russ.).
16. Ry`zhova, I.M., Podvezennaya, M.A., & Kirillova, N.P. (2022). Variabel`nost` zapasov ugleroda v avtomorfny`x i polugidromorfny`x pochvax lesny`x e`kosistem Evropejskoj territorii Rossii: sravnitel`ny`j statisticheskij analiz. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*. № 2. (in Russ.).
17. Strukturno-funktional`naya rol` pochvy` v biosfere (1999). Otv.red. G.V. Dobrovol`skij. M.: Geos, 278 s. (in Russ.).
18. Uglerod v lesny`x i bolotny`x e`kosistemax osobo oxranyaemy`x prirodnny`x territorij Respubliki Komi (2014). Komi nauchny`j centr UrO RAN. Sy`kty`vkar, 202 s. (in Russ.).
19. Fedorecz, N.G., Baxmet, O.N., Medvedeva, M.V., Axmetova, G.V., Novikov, S.G., Tkachenko, Yu.N., & Solodovnikov, A.N. (2015). Tyazhyoly`e metally` v pochvax Karelii. Petrozavodsk: Karel`skij nauchny`j centr RAN, 222 s. (in Russ.).
20. Chernova, O.V., Ry`zhova, I.M., Podvezennaya, M.A. (2020). Ocenka zapasov organicheskogo ugleroda lesny`x pochv v regional`nom masshtabe. *Pochvovedenie*, 3, 340-350. (in Russ.).
21. Shhepashhenko, D.G., Muxortova, L.V., Shvidenko, A.Z., & Vedrova, E`.F. (2013). Zapasy` organicheskogo ugleroda v pochvax Rossii. *Pochvovedenie*, 2, 123. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>. EDN PNQXGL. (in Russ.).

22. Bradshaw, C.J.A., & Warkentin, I.G. (2015). Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. *Global and Planetary Change*, 128, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>.
23. Chernova, O.V., Ryzhova, I.M., & Podvezennaya, M.A. (2020). Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale. *Eurasian Soil Science*, 53, 339-348. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030023>.
24. De Vos, B., Cools, N., Ilvesniemi, H., Vesterdal, L., Vanguelova, E., & Carnicelli, S. (2015). Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey. *Geoderma*, 251-252, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>.
25. Gleixner, G. (2013). Soil Organic Matter Dynamics, a Biological Perspective Derived from the Use of Compound-Specific Isotopes Studies. *Ecological Research*, 28, 683-695. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-1022-9>.
26. Hartley, I.P., Hill, T.C., Chadburn, C.E., & Hugelius, G. (2021). Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilisation capacities. *Nat. Commun.*, 12, 6713. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27101-1>.
27. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Sixth Assessment Report [Electronic resource] / IPCC. Electronic data. Access at: URL: <https://clck.ru/3QstcX> (accessed: 30.04.2025).
28. IPCC. (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge and New York, NY: Cambridge University Press.
29. Jandl, R., Lindner, M., & Vesterdal, L. et al. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>.
30. Lukina, N.V., Geraskina, A.P., & Gornov, A.V. et al. (2021). Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects. *Forest science issues*, 1, 4, 1-60. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202141k-60>.
31. Lukina, N.V., Orlova, M.A., Steinnes, E., Artemkina, N.A., Gorbacheva, T.T., Smirnov, V.E., & Belova, E.A. (2017). Mass-loss rates from decomposition of plant residues in spruce forests near the northern tree line subject to strong air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 24, 19874-19887. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9348-z>.
32. Moen, J., Rist, L., & Bishop, K. et al. (2014). Eye on the taiga: removing global policy impediments to safeguard the boreal forest. *Conservation Letters*, 7, 4, 408-418. <https://doi.org/10.1111/conl.12098>.
33. Osipov, A.F., Bobkova, K.S., & Dymov, A.A. (2021). Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. *Geoderma Regional*, 27, Article № e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00427>.
34. Paradis, L., Thiffault, E., & Achim, A. (2019). Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). *An International Journal of Forest Research*, 92, 264-277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz004>.
35. Post, W.M., Kwon, K.C., & Melillo, J.M. et al. (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298, 156-159.
36. Scharlemann, J.P.W., Tanner, E.V.J., Hiederer, R., & Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5, 1, 81-91. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.77>.

37. Schlesinger, W.H. (1977). Carbon storage in soils of the northern taiga. *Canadian Journal of Forest Research*, 7, 21-29.
38. Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G., & Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, GB 2023. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>.
39. Walker, M.D., Wahren, C.H., Hollister, R.D., Henry, G.H.R., Ahlquist, L.E., Alatalo, J.M., BretHarte, M.S., Calef, M.P., Callaghan, T.V., Carroll, A.B., Epstein, H.E., Jonsdottir, I.S., Klein, J.A., Magnusson, B., Molau, U., Oberbauer, S.F., Rewa, S.P., Robinson, C.H., Shaver, G.R., Suding, K.N., Thompson, C.C., Tolvanen, A., Totland, O., Turner, P.L., Tweedie, C.E., Webber, P.J., & Wookey, P.A. (2006). Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 103(5), 1342-1346. <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.0503198103>.
40. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences. (2022). (IUSS), Vienna, Austria, 236 p. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200417>.

дата поступления: 20.10.2025

дата принятия: 08.12.2025

© Живов Д.А., Сухарева Т.А., 2025